



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**NAHORU VYZAŘUJÍCÍ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY
PRO 3D AUDIO**

UP-FIRING LOUDSPEAKERS FOR 3D AUDIO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marko Pešek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Marko Pešek

ID: 172037

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Nahoru vyzařující reproduktorové soustavy pro 3D Audio

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě specifikací Dolby Atmos realizujte reproduktorové soustavy, které umožní rozšíření konfigurace reproduktorů 5.1 na konfiguraci 5.1.2. Vycházejte z již provedeného návrhu páru dvoupásmových nahoru vyzařujících reproduktorových soustav s definovaným rozměrem základny. Návrh zpřesněte dle konkrétních měničů, kterým nejdříve změřte jejich charakteristiky, které budou třeba pro zpřesnění návrhu. Ozvučnice realizujte z dřevovláknitých desek MDF. Po prvním změření kmitočtových a směrových charakteristik reproduktorové soustavy optimalizujte, aby byly dosaženy jejich požadované parametry. Provedte poslechové testy, které porovnají použití nahoru vyzařujících reproduktorových soustav se stropními reproduktorovými soustavami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LABORATORIES, Dolby Dolby Atmos Home Theater Installation Guidelines - April 2015. [Online]

<http://www.dolby.com/us/en/technologies/dolby-atmos/dolby-atmos-home-theater-installation-guidelines.pdf>

[2] DELLASALA, Gene. Dolby Atmos Elevation Speaker Height and Angle Specification. In: Audioholics A/V Magazine. 2014.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 8.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá nastudováním vícekanálového 3D audio formátu Dolby Atmos a parametrů nahoru vyzařujících reproduktivních soustav, které zajišťují reprodukci zvuku přicházejícího k posluchači shora za pomoci odrazu od stropu. Podle nastudovaných poznatků je proveden návrh nahoru vyzařujících reproduktorové soustavy, zhotovení a následné změření jejich vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vícekanálová reprodukce, Dolby Atmos, nahoru vyzařující reproduktor, reproduktory, ozvučnice, výhybka, HRTF

ABSTRACT

This bachelor theses dealing with study multichannel 3d audioformat Dolby Atmos and parameters of up-firing loudspeakers, which assures overhead audiosignal reproduction coming towards hearer. According to the knowledge is made proposal of up-firing loudspeakers, fabrication and measurement their properties.

KEYWORDS

Multichannel reproduction, Dolby Atmos, up-firing speakers, speakers, enclosure, crossover, HRTF

PEŠEK, Marko *Nahoru vyzařující reproduktorové soustavy pro 3D Audio*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 65 s. Vedoucí práce byl Ing. Miroslav Balík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Nahoru vyzařující reproduktorové soustavy pro 3D Audio“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Miroslavu Balíkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

1	Úvod	11
2	Vícekanálové zvukové systémy	12
2.1	Analogové systémy	12
2.1.1	Jednokanálové systémy	13
2.1.2	Dvojkanálové systémy	13
2.1.3	Tříkanálové systémy	14
2.1.4	Čtyřkanálové systémy	14
2.1.5	Pětikanálové systémy	15
2.2	Digitální systémy	15
2.2.1	Šestikanálové systémy	15
2.2.2	Sedmikanálové systémy	16
2.2.3	Osmikanálové systémy	16
3	Formát vícekanálového zvuku	
	Dolby Atmos	17
3.1	Rozdíl vůči předchozím zvukovým formátům	17
3.2	Konfigurace ozvučení v prostředí kinosálu	19
3.3	Konfigurace reproduktorových soustav v prostředí domácího kina	19
4	Možnosti reprodukce stropního kanálu	21
4.1	Využití stropních reproduktorů	21
4.2	Využití nahoru vyzařujících reproduktorů	22
5	Měniče vhodné pro reprodukci stropního kanálu	24
5.1	Měniče pro dvoupásmové soustavy	24
5.1.1	Středobasové měniče	24
5.1.2	Vysokotónové měniče	24
5.2	Koaxiální měniče	25
5.3	Stropní měniče	25
6	Teorie návrhu reproduktorové soustavy	26
6.1	Ozvučnice	26
6.1.1	Rovinná deska	26
6.1.2	Otevřená ozvučnice	27

6.1.3	Uzavřená ozvučnice	28
6.1.4	Ozvučnice typu bassreflex	29
6.2	Kmitočtová výhybka	31
6.2.1	HRTF filtr	32
6.2.2	Pásmová zadrž	34
6.2.3	Baffle step	34
6.2.4	Zobelova korekce	35
6.3	Stavební materiály	36
7	Porovnání stávajících řešení nahoru vyzařujících reproduktorů	38
8	Výběr měničů dle požadovaných parametrů	39
9	Měření reálných vlastností reproduktorů	40
9.1	Měření impedanční charakteristiky	40
9.2	Výpočet Thiele-Smallových parametrů	40
9.3	Měření frekvenční charakteristiky	42
10	Návrh ozvučnice	43
10.1	Objem ozvučnice	43
10.2	Konstrukce ozvučnice	45
11	Návrh kmitočtové výhybky	47
11.1	Analýza reálných vlastností reproduktorů	47
11.2	Konstrukce kmitočtové výhybky	48
12	Měření reproduktorové soustavy	50
12.1	Měření frekvenční charakteristiky	50
12.2	Měření směrové charakteristiky	52
12.3	Měření charakteristiky impedance a fáze	54
13	Závěr	55
	Literatura	57
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	58
A	Přílohy	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Jednokanálový systém	13
2.2	Dvojkanálový systém	13
2.3	Tříkanálový systém	14
2.4	Čtyřkanálový systém	14
2.5	Pětikanálový systém	15
2.6	Šestikanálový systém	16
2.7	Sedmikanálový systém	16
2.8	Osmikanálový systém	16
3.1	Lokalizace zvuku; vlevo předchozí systémy a vpravo Dolby Atmos cit.[1]	18
3.2	Vznik výsledného zvukového obrazu cit. [1]	18
3.3	Označení vícekanálových systémů	19
3.4	Konfigurace reproduktorů v domácím prostředí cit. [2]	20
4.1	Rozmístění stropních reproduktorů [2]	22
4.2	Reproduktorová soustava s nahoru vyzařujícím reproduktorem [2] . .	22
4.3	Odraz zvukových vln od stropu [3]	23
6.1	Rovinná deska cit. [4]	27
6.2	Otevřená ozvučnice cit. [4]	27
6.3	Uzavřená ozvučnice a mechanicko–analogický obvod v kombinaci s reproduktorem cit. [5]	28
6.4	Ozvučnice typu bassreflex a mechanicko–analogický obvod v kombi- naci s reproduktorem cit. [5]	30
6.5	Změna akustického tlaku a výchylky membrány reproduktoru v uza- vřené ozvučnici a ozvučnici typu bassreflex cit.[5]	30
6.6	Schéma filtrů 2. řádu	31
6.7	Schéma děliče pro vyrovnaní citlivosti reproduktoru	32
6.8	Frekvenční charakteristika HRTF filtru cit.[6]	33
6.9	Schéma HRTF filtru pro nahoru vyzařující reproduktory cit.[6]	33
6.10	RLC schéma pásmové zádrže	34
6.11	Schéma zapojení korekce Baffle step	35
6.12	Schéma zapojení Zobelovy korekce	36
8.1	Impedanční a kmitočtová charakteristika měniče Monacor SPH–135Kep	39
8.2	Impedanční a kmitočtová charakteristika měniče Monacor DT–28N .	39
10.1	Graf simulace uzavřené ozvučnice s objemem 3,38 l	44
10.2	Graf simulace bassreflexové ozvučnice s objemem 3,38 l	45
10.3	3D model reproduktorové soustavy	46
10.4	Blokové schéma možností zapojení	46
11.1	Blokové schéma kmitočtové výhybky	48

11.2 Simulace kmitočtové výhybky bez HRTF	49
11.3 Simulace kmitočtové výhybky s HRTF	49
12.1 Kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy s HRTF	51
12.2 Kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy bez HRTF	51
12.3 Směrová charakteristika bez přesahujících bočnic	52
12.4 Směrová charakteristika s přesahujícími bočnicemi	53
12.5 Směrová charakteristika s přesahujícími bočnicemi a tlumením	53
12.6 Impedanční a fázová charakteristika reproduktorové soustavy	54
A.1 Impedanční a fázová charakteristika SPH-135Kep-1	59
A.2 Impedanční a fázová charakteristika SPH-135Kep-2	59
A.3 Frekvenční charakteristika volně zavěšeného SPH-135Kep-2	59
A.4 Frekvenční charakteristika volně zavěšeného DT-28N-2	60
A.5 Frekvenční charakteristiky SPH-135Kep v ozvučnici	60
A.6 Frekvenční charakteristiky DT-28N-2 v ozvučnici	60
A.7 Schéma zapojení kmitočtové výhybky	61
A.8 DPS pro HRTF filtr	62
A.9 DPS pro kmitočtovou výhybku 1. část	62
A.10 DPS pro kmitočtovou výhybku 2. část	62
A.11 Osazovací plán pro DPS HRTF filtru	63
A.12 Osazovací plán pro DPS kmitočtové výhybky 1. část	63
A.13 Osazovací plán pro DPS kmitočtové výhybky 2. část	63
A.14 Zhotovené desky plošných spojů kmitočtové výhybky	64
A.15 Osazené desky plošných spojů kmitočtové výhybky	64
A.16 Reproduktorová soustava bez bočnic	65
A.17 Reproduktorová soustava s bočnicemi	65

1 ÚVOD

Cílem bakalářské práce je nastudování principu nahoru vyzařující reproduktorové soustavy pro reprodukci stropního kanálu vícekanálového 3D formátu Dolby Atmos a její následná realizace.

V první části se zabývám historií vícekanálového ozvučení, formátem vícekanálového ozvučení Dolby Atmos, reprodukcí stropního kanálu, měniči určenými pro stropní kanál a teorií pro návrh ozvučnice.

V druhé části bakalářské práce se soustředím na výběr vhodných reproduktorů, měření parametrů použitých reproduktorů potřebných pro návrh ozvučnice, návrh kmitočtové výhybky a následné zhotovení nahoru vyzařující reproduktorové soustavy.

Poslední část práce je věnována naměřeným parametrům a charakteristikám zhotovené nahoru vyzařující reproduktorové soustavy a obsahuje jejich následné porovnání s požadavky Dolby Atmos.

2 VÍCEKANÁLOVÉ ZVUKOVÉ SYSTÉMY

Hlavním cílem vícekanálových zvukových systémů je podpoření děje filmu a docílení realistické reprodukce zvuku tak, aby se blížila přirozenému vnímání.

Průkopníkem v oblasti vícekanálového ozvučení byl Alan Bluemlein, jenž ve třicátých letech 20. století vedl výzkum vícekanálové reprodukce zvuku v laboratořích Bell. Pod jeho vedením zde vznikla stereofonní reprodukce. Dále se zabýval vývojem vícekanálového systému s využitím několika reproduktorových soustav pro vytvoření zvukového pole obklopujícího posluchače, aby tím docílil přirozeného zvukového vjemu pro posluchače. Vývojem a nárůstem obliby vícekanálové reprodukce a záznamu zvuku došlo k standardizaci používaných vícekanálových formátů a systémů.

V dnešní době není vícekanálové ozvučení jen doménou filmů, jak tomu bylo ze začátku, ale jeho využití narůstá s vývojem nových technologií a požadavků posluchače. Vícekanálové ozvučení je dnes použito v různých odvětvích reprodukce zvuku, např. v počítačových hrách, rádiích, virtuální realitě atd.

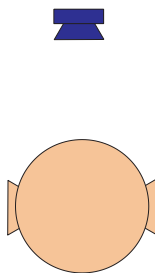
2.1 Analogové systémy

První zaznamenávání a reprodukce zvukového signálu přímo na filmový pás probíhala za využití optického záznamu zvuku. K největšímu problému zde docházelo při synchronizaci obrazu se zvukem. Pohyb filmu v kameře i promítacím přístroji je krokový, ale zvuk musí být přehráván spojitě. Tento problém byl vyřešen tzv. ukliďňovací smyčkou, která musela proběhnout před záznamem nebo reprodukcí. Tímto je zvuk posunut vůči filmovému pásu, předbíhá obraz o 21 políček. Nevýhodou tohoto systému byla absence postprodukčních oprav.

Ve 30. letech 20. století byla vyvinuta nová metoda záznamu zvuku pomocí magnetizace. Výhodou magnetického záznamu zvuku oproti optickému je jednoduchá možnost opravy zvukové stopy. Tato metoda vytlačila ostatní záznamy zvuku a stala se dominantní ve všech odvětvích záznamu zvuku. Rádía, televize, kinematografický průmysl a nahrávací studia používají tuto metodu dodnes.

2.1.1 Jednokanálové systémy

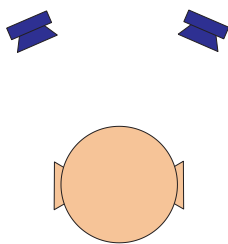
Jedna z prvních reprodukcí zvuku probíhala pouze z jednoho bodu v prostoru obr. (2.1). Dnešní vícekanálové systémy lze do režimu Dolby Digital 1.0 přepnout (funkce MONO). Je vybrán pouze jeden kanál, který je přiveden do všech kanálů. Tím je ztracena možnost prostorového efektu, ale je docíleno prostorově širšího vjemu reprodukováného zvuku.



Obr. 2.1: Jednokanálový systém

2.1.2 Dvojkanálové systémy

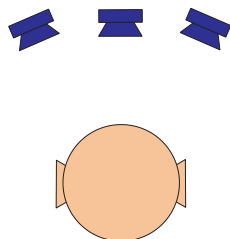
Dvojkanálový neboli stereofonní systém byl vyvinut v roce 1930, ale k jeho aktivnímu použití došlo až v roce 1960. Oba dva kanály mají stejnou frekvenční šířku pásma. Posluchač zde díky dvěma zdrojům akustického signálu (obr. 2.2) rozeznává zvuk přicházející ze dvou stran.



Obr. 2.2: Dvojkanálový systém

2.1.3 Tříkanálové systémy

Zvukové pole stereo je zde rozloženo buď do tří předních (obr. 2.3) kanálů, nebo je jeden z kanálů umístěn za záda posluchače, a ten vnímá zvuk přicházející zepředu i zezadu. Toto rozmístění se stalo mezikrokem přechodu od stereofonie ke kvadrofonii.

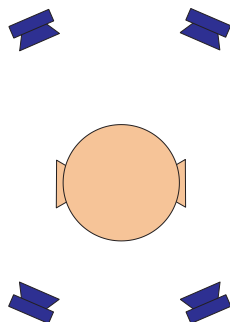


Obr. 2.3: Tříkanálový systém

,

2.1.4 Čtyřkanálové systémy

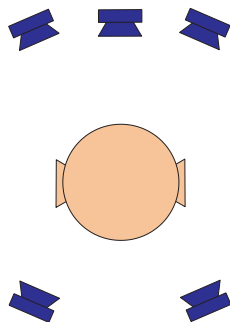
V praxi jsou tyto systémy spíše pojmenovány jako kvadrofonní systémy, kde záznam nebo reprodukce probíhá ze čtyř bodů rozmístěných v prostoru (obr. 2.4) tak, aby reproduktory nebo snímače zvukových signálů byly v rozích místnosti. Tím je docíleno prostorového efektu, zvukový signál přichází ze stejného místa, kde je snímán.



Obr. 2.4: Čtyřkanálový systém

2.1.5 Pětikanálové systémy

První zvukový systém, který využívá pět reproduktorů, byl v roce 1980 Dolby Surround Pro Logic I. Tento systém je na rozdíl od kvadrofonie doplněn o středový reproduktor pro reprodukci dialogů ve filmu (obr. 2.5). Zbytek reproduktorů plní stejnou funkci jako u předešlých systémů.



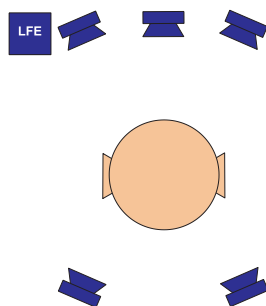
Obr. 2.5: Pětikanálový systém

2.2 Digitální systémy

S nástupem digitálních technologií bylo možné uložit větší počet zvukových kanálů než čtyři u analogových systémů. Pro přenos kanálů na distribuční médium se používá označení vícekanálových systémů kódem ve formátu $X.Y$, kde X je počet kanálů s neomezeným kmitočtovým spektrem a Y počet kmitočtově omezených signálů. Druhým typem značení je M/N , kde M je počet předních kanálů a N počet zadních (stranových) kanálů. Tím dosáhneme přesnějšího definování smyslu jednotlivých zvukových kanálů, kdy přední kanály slouží k vyzáření zvukového signálu lokalizovaného posluchačem a zadní (stranové) jsou použity k vytvoření zvukového prostředí, u kterého nezáleží na směru přicházejícího signálu k posluchači.

2.2.1 Šestikanálové systémy

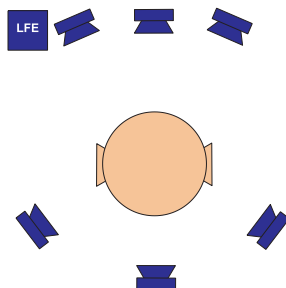
První digitální zvukovým systémem Dolby digital 5.1 využíval šesti kanálů. Obsahuje pět kanálů s rozsahem 20 Hz – 20 kHz a šestý kanál LFE, kde jsou obsaženy informace pro subwoofer. Díky LFE kanálu došlo k možnosti reprodukce nízkých frekvencí <120 Hz. Každý kanál je zaznamenáván odděleně. Dalším formátem využívající šest kanálů je Dolby Pro Logic II. Jedná se o rozšíření analogového formátu Dolby Surround Pro Logic I zpětným kanálem a kanálem subwooferu.



Obr. 2.6: Šestikanálový systém

2.2.2 Sedmikanálové systémy

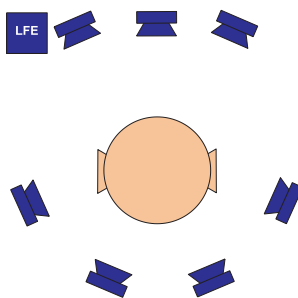
Obsahují šest kanálů a kanál LFE. Jedná se o doplnění formátu 5.1 zadním středovým reproduktorem na formát 6.1 (obr.2.7). Díky této změně topologie systému může posluchač určit přesněji směr příchozího signálu.



Obr. 2.7: Sedmikanálový systém

2.2.3 Osmikanálové systémy

Přidáním dvou nových kanálů k již stávající topologii 5.1 došlo k vzniku systému se značením 7.1 (obr.2.8), který je v dnešní době nejpoužívanější společně s jejím předchůdcem 5.1.



Obr. 2.8: Osmikanálový systém

3 FORMÁT VÍCEKANÁLOVÉHO ZVUKU DOLBY ATMOS

Cílem výzkumu vícekanálových zvukových systému je přiblížit se co nejvíce přirozenému vnímání zvuku v běžném životě, to je ve všech rovinách.

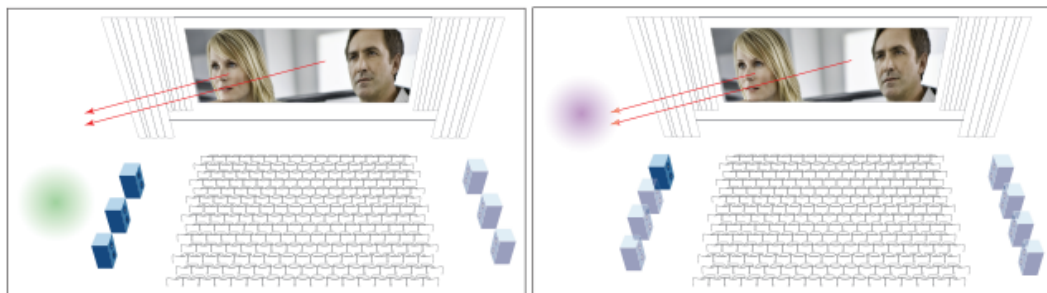
V roce 2012 přišla společnost Dolby Laboratories s novým formátem vícekanálového zvuku Dolby Atmos. Zatímco dosavadní vícekanálové formáty pokrývaly prostor jen dvojrozměrně, formát Dolby Atmos dokáže obklopit posluchače v 3D rozměru a tím napodobit přirozené prostředí pro posluchače. Ve společnosti Dolby toho dosáhli novým způsobem adresování zvukových signálů do reproduktorových soustav a jejich rozmístěním.

Formát Dolby Atmos počítá s tím, že konfigurace reproduktorů a velikost poslechového prostoru nelze v kinosálech a obzvláště v domácích prostředích standardizovat. Pro každou konfiguraci reproduktorů probíhá při prvním spuštění jednotlivých kanálů kalibrace. Na základě této kalibrace si zvukový procesor vytvoří matici, dle které adresuje jednotlivým kanálům zvukové signály. Výsledkem je lepší kvalita zvuku, zvukové zabarvení a lepší prostorová orientace posluchače. Tento způsob se zásadně liší od předchozích formátů, jejichž datový proud nese pevně dané informace určené zvukovému procesoru. Tyto informace pevně nastavují intenzitu u daného reproduktoru v předem známé konfiguraci, a tím vyvolají prostorový zvukový efekt. Zásadní nevýhoda systému Dolby Atmos spočívá právě v kalibraci, kdy je ideální místo pro poslech umístěno na stejné pozici jako kalibrační snímač. Toto místo se v praxi nazývá *sweet spot*. V kinech toto místo bývá uprostřed první třetiny sálu a v domácích kinech zejména na místě posluchače. V případě umístění posluchače do jiného místa, než je *sweet spot*, vzniká mírné zkreslení prostorové orientace posluchače.

3.1 Rozdíl vůči předchozím zvukovým formátům

Zvukové procesory nemohou směřovat daný zvuk pouze do jednoho reproduktoru, ale musejí používat celé pole reproduktorů, a tím dochází k nepřesnému určení směru přicházejících signálů. Díky možnosti směřovat daný zvukový signál do potřebného množství reproduktů nebo i samostatného reproduktoru, může posluchač přesněji určit směr přicházejícího zvukového vjemu (obr. 3.1).

U předešlých zvukových systémů mají prostorové a přední reproduktory rozdílné parametry, a to zejména frekvenční rozsah a citlivost. Tím vzniká problém, kdy zvuk z předních reproduktorů nemůže plynule přecházet do místnosti a zachovat si stejné vlastnosti, jako kdyby vycházel z předních reproduktorů.



Obr. 3.1: Lokalizace zvuku; vlevo předchozí systémy a vpravo Dolby Atmos cit.[1]

Díky adresaci zvukových signálů jednotlivým reproduktorům dokáže formát Dolby Atmos vytvořit lepší výsledný zvukový obraz. Dolby Atmos skládá výsledný obraz ze dvou složek, a to složky pozadí a složky objektů. Kombinací těchto dvou složek dojde ke vzniku finálního zvukového vjemu (obr.3.1).



Obr. 3.2: Vznik výsledného zvukového obrazu cit. [1]

Systém Dolby Atmos navíc obsahuje stropní kanály, které slouží k lokalizaci zvukových signálů šířících se po vertikální rovině. Díky těmto kánalům lze zvuk v prostoru vnímat ve 3D. Kvalita a přesnost lokalizace zvukového signálu ve vertikální rovině závisí na počtu instalovaných elektroakustických měničů, přičemž minimální počet měničů musí být alespoň jeden pár. Reprodukce stropního kanálu probíhá za pomoci stropních elektroakustických měničů, nebo nahoru vyzařujících reproduktorových soustav v případě domácího použití.

Formát Dolby Atmos je od základu navržen tak, aby byl kompatibilní se staršími formáty a zároveň byl schopný používat dosavadní způsob záznamu a zpracování zvuku.

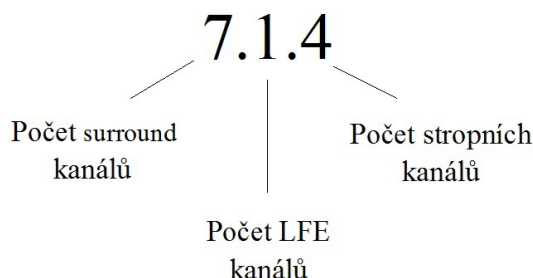
3.2 Konfigurace ozvučení v prostředí kinosálu

Díky principu formátu Dolby Atmos neexistuje přesný předpis pro to, jak by měly být umístěny reproduktory v kinosálech. Dolby Atmos po kalibraci převezme informace o rozmístění reproduktorů a sám přizpůsobí adresování dle zvoleného rozložení.

Zvukový formát Dolby Atmos podporuje maximálně 64 kanálů (reproduktorových soustav), a tím je omezen počet použitých měničů. Použití menšího počtu reproduktorových soustav nemá žádný vliv a systém se přizpůsobí. Nejčastější konfigurace využívající všech kanálů poskytovaných Dolby Atmos je 62.2, kde jsou obsaženy informace pro 62 reproduktorových soustav umístěných v prostoru a dva subwoofery.

3.3 Konfigurace reproduktorových soustav v prostředí domácího kina

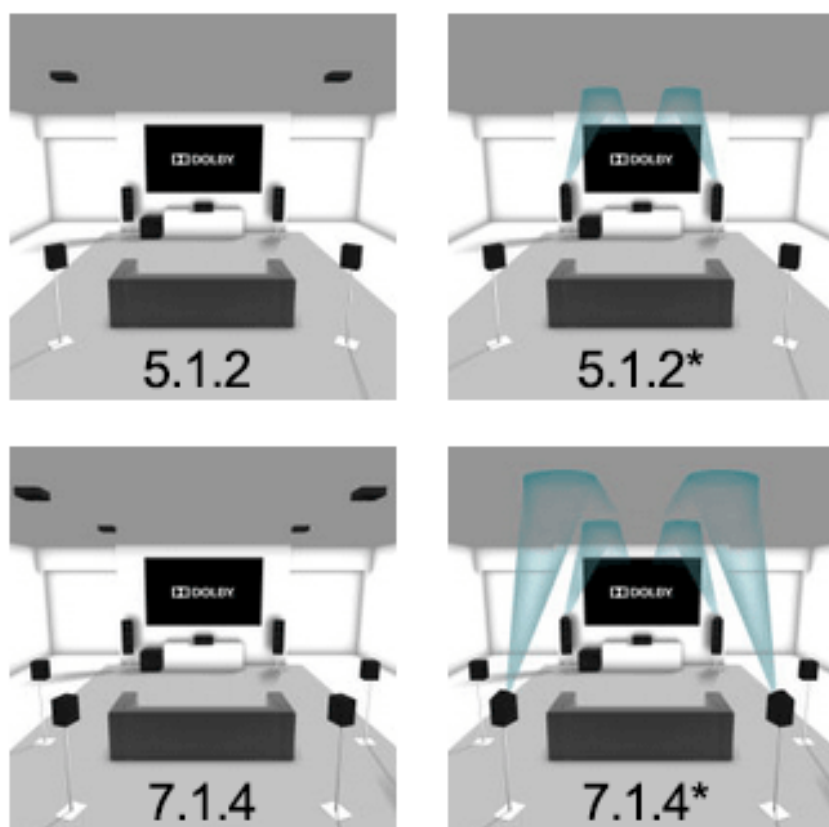
Formát Dolby Atmos pro prostředí domácího kina vznikl přidáním nových stropních kanálů k již stávajícím konfiguracím Dolby Surround. Tím došlo i k rozšíření kódu označující vícekanálové systémy na formát $X.Y.Z$, kdy písmena X a Y opět určují počet daných kanálů (viz.2.2) a písmeno Z určuje počet stropních kanálů.



Obr. 3.3: Označení vícekanálových systémů

Reprodukcí stropních kanálů lze v domácím prostředí provést dvěma způsoby: použitím stropních reproduktorů, nebo nahoru vyzařujících reproduktorů. Problematikou těchto řešení se budu zabývat v následující kapitole. Nejčastěji používané topologie 5.1 a 7.1 jsou doplněny o jeden nebo dva páry reproduktorů pro stropní kanál. Tím je dosaženo topologií označených 5.1.2, 5.1.4, 7.1.2 a 7.1.4.

Na obrázku 3.4 jsou zobrazeny topologie reproduktorových soustav používaných pro zvukový formát Dolby Atmos, který využívá nahoru vyzařujících a stropních reproduktorů.



Obr. 3.4: Konfigurace reproduktorů v domácím prostředí cit. [2]

4 MOŽNOSTI REPRODUKCE STROPNÍHO KANÁLU

Reprodukce stopního kanálu v prostředí domácího kina je uskutečněna pomocí stropních reproduktorů nebo nahoru vyzařujících reproduktorů. Počet a způsob reprodukce stropního kanálu volíme v závislosti na prostoru, který chceme pokrýt. Nej důležitějším parametrem je strop místnosti, ve které má probíhat reprodukce.

Při použití stropních reproduktorů dochází k zásahu do stropu, což může být problém, který vyřešíme použitím nahoru vyzařujících reproduktorů. Se stropními reproduktory je dobré počítat v případě rekonstrukce či stavby místnosti a provést jejich instalaci v rámci stavebních prací.

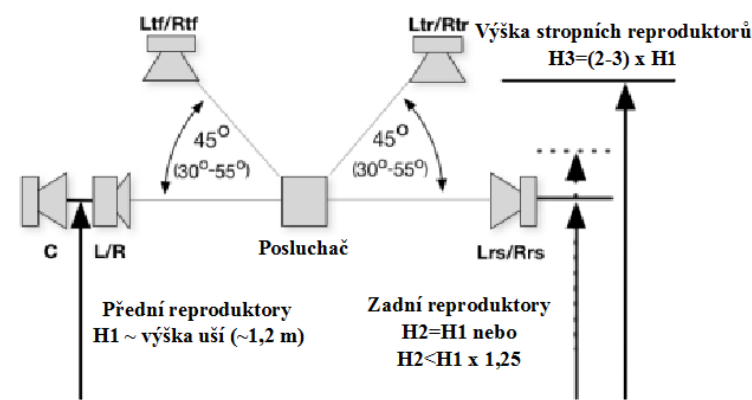
4.1 Využití stropních reproduktorů

Za nejlepší variantu reprodukce stropního kanálu jsou považovány stropní reproduktory. Stropní reproduktory nám dokáží pokrýt velkou plochu prostoru díky široké směrové charakteristice. Nedochází zde k parzitním jevům, které vznikají u nahoru vyzařujících reproduktorů kvůli odrazu.

Stropní reproduktory pro reprodukci stropního kanálu formátu Dolby Atmos by měly mít vyzařující úhel 45° od akustické osy reproduktoru nebo širší a schopnost reprodukce frekvencí v pásmu od 100 Hz do 10 kHz a výš, poté mohou být umístěny vzhledem k akustické ose kolmo k podlaze. V případě menšího vyzařujícího úhlu reproduktorů musí být reproduktory natočeny k sweet pointu neboli posluchači.

Výška umístění stropních reproduktorů by měla odpovídat dvoj až trojnásobku vzdálenosti hlavy posluchače od země a reproduktory by měly svírat úhel v rozmezí 30° – 55° s horizontální osou ve výšce uší posluchače, ideálně se volí 45° . Tímto úhlem je udána vzdálenost reproduktorů před a za posluchačem. Vzdálenost reproduktorů vpravo a vlevo od posluchače má být od kraje reproduktorů 0,5 až 0,7 násobkem šířky místnosti. Umístění stropních reproduktorů je znázorněno na obr. 4.1.

Při použití stropních reproduktorů je doporučeno na stěny umístit prvky, které absorbují zvuk, a na podlahu koberec. Tyto prvky zabrání vzniku odrazů signálů, které by rušily zvukový vjem přicházejících signálů shora.

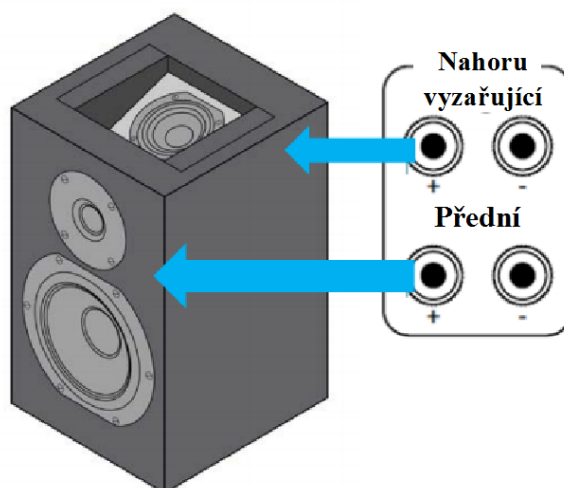


Obr. 4.1: Rozmístění stropních reproduktorů [2]

4.2 Využití nahoru vyzařujících reproduktorů

Nahoru vyzařující reproduktory byly navrženy na základě znalostí psychoakustiky. Fungují na principu odrazu zvukových vln, kdy se vlna dopadající na strop odrazí a vytvoří tak pocit, že vlna přichází od stropu. Nedojde ale k úplnému odrazu, protože žádný strop není ideálně odrazivý a část vlny je pohlcena.

Nahoru vyzařující reproduktory jsou vyráběny ve dvou variantách. První formou je přídavný modul, který přidáním s A/V receiverem k topologii 5.1 nebo 7.1 vytvoří soustavu zvládající požadavky formátu Dolby Atmos. Druhou variantou jsou reproduktorové soustavy, které jsou již osazené nahoru vyzařujícím reproduktorem (obr. 4.2).

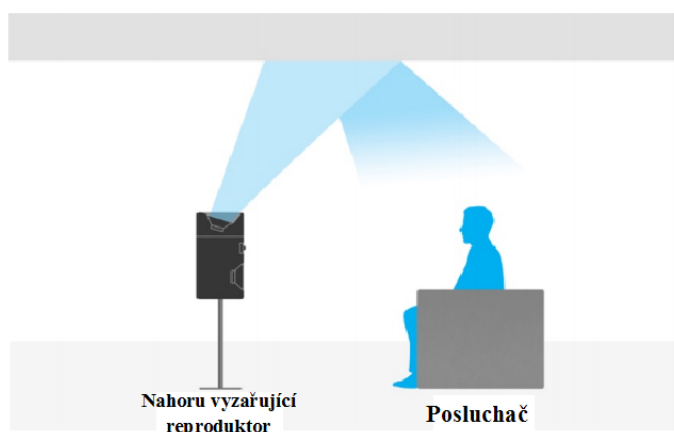


Obr. 4.2: Reproduktorová soustava s nahoru vyzařujícím reproduktorem [2]

Nahoru vyzařující reproduktory by měly být schopny vyzářit frekvenční pásmo v rozsahu 180 Hz – 16 kHz a výše. Základem je úzká vyzařovací charakteristika, díky které nedochází k posluchači přímé vlny, ale jen vlny odražené od stropu, a tím nedochází k narušení prostorového zvuku. Toho je docíleno použitím reproduktorů s úzkou směrovou charakteristikou zejména na středních a vyšších kmitočtech, anebo zapuštěním reproduktoru do ozvučnice (obr.4.2).

Při použití nahoru vyzařujících reproduktorů je potřeba splňovat tyto požadavky na strop místnosti, který by měl mít v ideálním případě výšku 2,3–3,6 metrů od podlahy, měl by být z dokonale odrazivého materiálu a měl by být rovný. V případě různě klenutých stropů nebo stropů z neodrazivého materiálu nedochází k požadovanému odrazu potřebnému ke vzniku efektu zvuku přicházejícího shora.

Tím, že nahoru vyzařující reproduktory mají dán pevný úhel osy reproduktoru vůči stropu 70° , je nutné dodržet pro zachování efektu vzdálenost posluchače od reproduktoru. Tato vzdálenost se mění s počtem použitých reproduktorů a se vzdáleností reproduktorů od stropu.



Obr. 4.3: Odraz zvukových vln od stropu [3]

Nahoru vyzařující reproduktory jsou umísťovány již ke stávajícím topologiím 5.1 a 7.1. V případě použití jednoho páru jsou reproduktory umístěny na vrchní část přední levé a pravé reproduktorové soustavy. Při použití dvou reproduktorových párů umístíme druhý pár na vrchní část zadní levé a pravé reproduktorové soustavy. Pokud vybrané reproduktory nelze z konstrukčních důvodů umístit na již stávající reproduktory, mohou být umístěny mimo ně, ale nesmí být od nich vzdáleny více než 0,9 m a nesmí být umístěny výše než v polovině zdi. Musí být ovšem umístěny od posluchače ve vzdálenosti 0,9 m–1,5 m.

5 MĚNIČE VHODNÉ PRO REPRODUKCI STROPNÍHO KANÁLU

Základním požadavkem na měniče určené k reprodukci stropního kanálu je možnost reprodukce frekvenčního pásma od 180 Hz do 16 kHz. K tomuto účelu lze podle reproduktorové konfigurace použít stropní reproduktory, nebo nahoru vyzařující reproduktorovou soustavu, která je osazena koaxiálními nebo běžnými elektroakustickými měniči.

5.1 Měniče pro dvoupásmové soustavy

Pro dvoupásmové soustavy jsou používány zejména kombinace středobasového a vysokotónového měniče. Při zvolení kvalitních elektroakustických měničů nám tato kombinace zajistí dostatečné a vyrovnané pokrytí slyšitelného frekvenčního pásma. Podle požadavků na reproduktorovou soustavu může být použita i kombinace hlubokotónového a výškového měniče. Tato kombinace je však silně závislá na kvalitě reprodukce vyšších frekvencí v oblasti dělicího kmitočtu výhybky, kde by mohlo dojít k nevyrovnanosti výsledné frekvenční charakteristiky reproduktorové soustavy.

5.1.1 Středobasové měniče

Úkolem středobasové měniče je reprodukovat pásmo kmitočtu od 100 Hz do 5000 Hz, avšak kvalitní měniče v dnešní době dokáží reprodukovatelné kmitočtové pásmo rozšířit. Spodní kmitočet již nelze značně ovlivnit hlavně z důvodů konstrukce a velikosti membrány, ale kvalitní reproduktory dokáží reprodukovat kmitočty až velikosti 10 kHz.

5.1.2 Vysokotónové měniče

Vysokotónové měniče slouží k reprodukci zvukových signálů s frekvencí nad 2000 Hz až po 20 kHz a dle kvality reproduktoru i výše. V domácích konfiguracích se používají zejména výškové reproduktory membránové a kalotové.

Vysokotónové reproduktory nemají jednotnou konstrukci, uspořádání, tvar horny a difuzoru. Důvodem je, že vyzařování vysokých kmitočtů obsahuje spoustu problémů. Vlnová délka vyzařovaných signálů je často menší než velikost membrány. Tento efekt způsobuje, že s rostoucím vyzařovaným kmitočtem klesá i vyzařovací úhel reproduktoru.

5.2 Koaxiální měniče

Jedná se typ širokopásmového elektroakustického měniče, který je schopen pokrýt široké frekvenční pásmo. Konstrukčně se reproduktor skládá ze dvou měničů (středobasového a výškového) umístěných souose, které tvoří dvoupásmový systém. Tento systém používá k rozdělení kmitočtového pásma jednoduchých výhybek 1. nebo 2. řádu, které bývají zabudovány v konstrukci reproduktoru. Jedná se o nejkvalitnější možnost jak jedním reproduktorem pokrýt široké frekvenční pásmo, přibližuje se svými parametry ideálnímu bodovému zdroji zvuku.

Použití tohoto měniče eliminuje problémy, které vznikají rozmístěním reproduktorů u reproduktorových soustav. Eliminují zejména interferenci vln, které vycházejí z různých zdrojů a urazí rozdílnou vzdálenost k posluchači. Tímto vlivem vzniká fázový posun jednotlivých zvukových signálů a tím se zhoršuje směrová charakteristika soustavy. Koaxiální reproduktory tyto nedostatky eliminují a díky tomu dochází k lepší lokalizaci zdroje akustického signálu.

Kvalitní koaxiální reproduktory, které mají vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku v celém slyšitelném kmitočtovém pásmu, jsou poměrně drahé, a tak je jejich využití značně omezené touto skutečností.

5.3 Stropní měniče

Zásadním problémem použití těchto reproduktorů je zvolení vhodné ozvučnice. Typ a velikost ozvučnice zásadně ovlivňují vlastnosti reproduktoru. Reproktory, které jsou zabudované do stropu mají jako ozvučnici otvor ve stropě, do kterého jsou nainstalovány. Tento otvor může nabývat různých rozměrů a ovlivňovat tak vlastnosti reproduktoru. Tento problém se výrobci snaží řešit uzavřeným reproduktorovým košem. Reproduktořový koš je schován v obalu, který lze považovat za uzavřenou ozvučnici. Tato konstrukční varianta dává reproduktoru předem jasné vlastnosti, které neovlivní velikost stropního otvoru, ve kterém je reproduktor usazen.

U stropních měničů se používá zejména koaxiálních a triaxiálních měničů, protože pokryjí celé frekvenční pásmo a mají malé rozměry. Účelem stropních reproduktorů je pokrýt co největší plochu pod sebou, tudíž je u nich kladen důraz na širokou směrovou charakteristiku.

6 TEORIE NÁVRHU REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Reproduktorové soustavy používáme pro, že dosavadními technologiemi nedokážeme vyvinout zcela ideální elektroakustický měnič, na který jsou kladeny vysoké požadavky. Ideální měnič by měl mít vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku a lineární přenos v celém slyšitelném kmitočtovém pásmu (20 – 20000 Hz). Těchto požadavků lze dosáhnout kombinací dvou a více typů elektroakustických měničů a jejich umístěním do reproduktorové soustavy.

6.1 Ozvučnice

Hlavním účelem reproduktorové ozvučnice je zamezit akustickému zkratu. Reproductor jakožto zdroj zvuku vyzařuje akustické vlny jak před membránu, tak i za membránu, kde jsou akustické vlny s opačnou fází. Pokud tedy nedojde k zamezení vzájemné interference přední a zadní akustické vlny volbou vhodné ozvučnice, dojde ke střetu stejných vln s opačnou fází v místě posluchače, a ty se navzájem vyruší. Ozvučnice neboli reproduktorová skříň slouží k oddělení těchto dvou vln a její funkce se týká zejména nízkých kmitočtů. Návrh je tedy prováděn podle vlastností elektroakustického měniče určeného pro reprodukci nižších frekvencí.

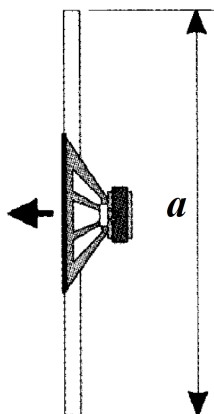
Zabudováním reproduktoru dojde ke změně frekvenční charakteristiky a změně vyzařovací impedance. Změna vyzařovací impedance způsobí zmenšení maximální výchylky pod určitým kmitočtem. Tím vydrží měnič v této oblasti větší výkon.

6.1.1 Rovinná deska

Jedná se o nejjednodušší provedení ozvučnice. V teorii ji považujeme za nekonečnou (s nekonečnými rozměry). V praxi se uvažuje s konečnými rozměry, zejména pro plošné ozvučování. Konečné rozměry určují, že ozvučnice bude správně fungovat až do určitého kmitočtu. Pro čtvercovou rovinnou desku o rozměrech $a \times a$ platí [5]

$$f_0 = \frac{c_0}{2a}, \quad (6.1)$$

kde c_0 je rychlost šíření zvuku a f_0 je rezonanční kmitočet deskové ozvučnice. Výhodou této ozvučnice je její jednoduchá konstrukce a nepřítomnost stojatých vln. Nevýhodou je nízká účinnost na nízkých kmitočtech, která vzniká kvůli akustickému zkratu.



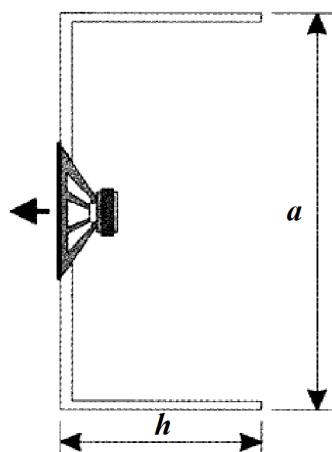
Obr. 6.1: Rovinná deska cit. [4]

6.1.2 Otevřená ozvučnice

Otevřená ozvučnice se kdysi používala ve velké míře u elektronkových televizorů a rozhlasových přijímačů. V dnešní době se používá zejména u kytarových komb, kde zadní část reproduktorové skříně je částečně nebo zcela otevřená. Stejně jako u rovinné desky je zde akustický zkrat omezen jen zčásti. Míra už není ovlivněna jen velikostí přední desky, ale i hloubkou. Zvětšováním hloubky ozvučnice se hodnota dolního mezního kmitočtu zmenšuje a činitel jakosti se zvětšuje. Mezní kmitočet otevřené ozvučnice f_0 je pro skříně s malou hloubkou určen z vztahu [5]

$$f_0 = \frac{55}{h\sqrt{1 + \frac{a}{2h}}}, \quad (6.2)$$

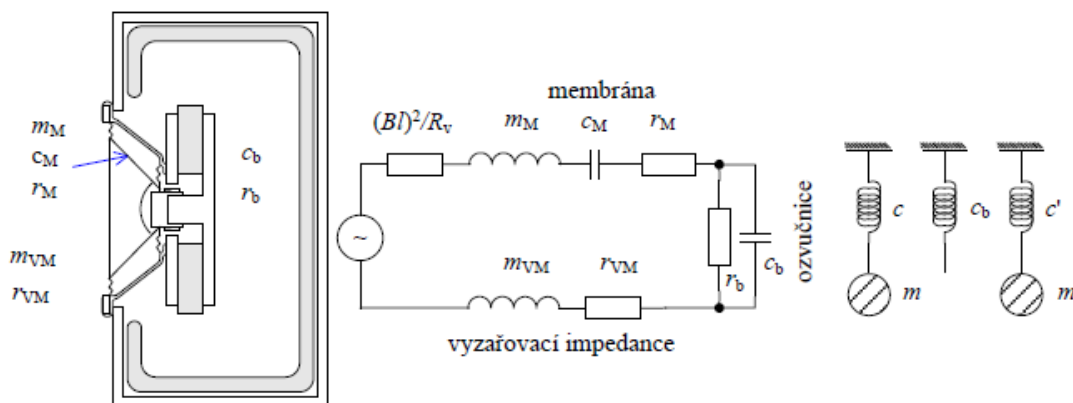
kde a je šířka a h hloubka ozvučnice.



Obr. 6.2: Otevřená ozvučnice cit. [4]

6.1.3 Uzavřená ozvučnice

Jako ideální ozvučnici pro reproduktor uvažujeme nekonečnou rovinnou desku, která ovšem nejde zrealizovat. Uzavřená ozvučnice (hermeticky uzavřená skříň určitého objemu) je jakýmsi kompromisem. Energie zadní vlny vyzářené reproduktorem do ozvučnice se přemění v teplo, tím se ale sníží účinnost reproduktoru.



Obr. 6.3: Uzavřená ozvučnice a mechanicko–analogický obvod v kombinaci s reproduktorem cit. [5]

Na obr. 6.3 je vidět, jak se reproduktoru mění jeho vlastnosti vsazením do uzavřené ozvučnice. V mechanicko–akustické analogii reproduktor reprezentuje pružina o poddajnosti c se zavěšeným závažím o hmotnosti m . Samostatný objem ozvučnice V_b se chová jako nová pružina o poddajnosti c_b . Při kombinaci těchto dvou pružin vzniká nová pružina s větší poddajností c' se zavěšeným závažím m . Z tohoto principu je jasné, že vsazením reproduktoru do uzavřené ozvučnice zvýšíme jeho rezonanční kmitočet f_c , pro který platí [5]

$$\frac{f_c}{f_r} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} = \sqrt{\frac{c_M}{c_b} + 1}, \quad (6.3)$$

kde f_r je rezonanční frekvence reproduktoru, V_{as} je ekvivalentní objem reproduktoru, V_b je objem ozvučnice, c_M je poddajnost uložení kmitacího systému reproduktoru a c_b poddajnost objemu ozvučnice.

S rostoucím rezonančním kmitočtem se zvýší i celkový činitel jakosti obvodu Q_s podle rovnice [5]

$$\frac{Q_c}{Q_s} = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} = \sqrt{\frac{c_M}{c_b} + 1}, \quad (6.4)$$

Z této rovnice vyplývá, že vsazením reproduktoru do uzavřené ozvučnice dojde ke zvýšení amplitudy reprodukováných signálů v okolí rezonančního kmitočtu a ke

zvýšení strmosti impedanční charakteristiky v okolí rezonančního kmitočtu. S touto vlastností uzavřené ozvučnice je potřeba počítat při návrhu.

Dalším důležitým parametrem, který uzavřená ozvučnice ovlivní, je snížení charakteristické citlivosti. Charakteristická citlivost se udává pro reproduktor umístěný do poloprostoru, kde je dokonale rozdělená zadní a přední vlna (rovinná deska). Následkem vsazení do uzavřené ozvučnice je utlumení jedné zadní vlny a snížení charakteristik citlivosti na nízkých kmitočtech až o 6 dB.

6.1.4 Ozvučnice typu bassreflex

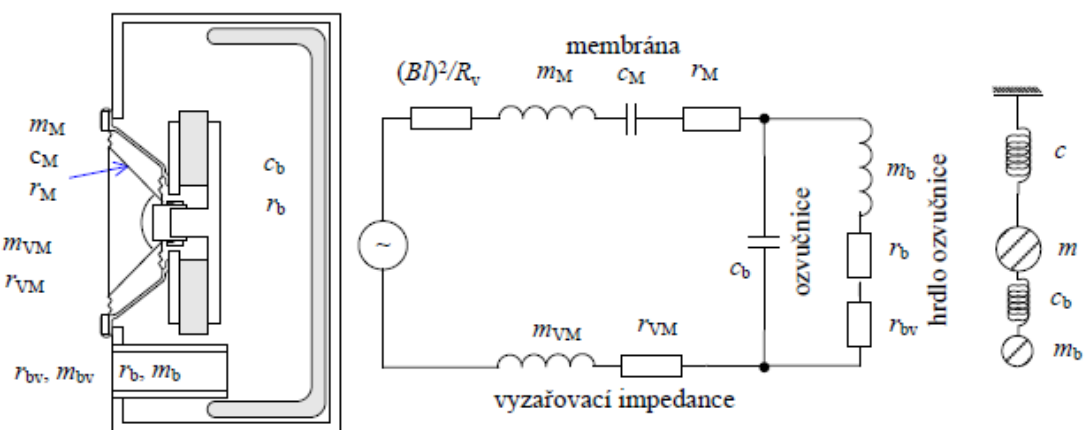
Bassreflexová ozvučnice vznikne umístěním bassreflexového nátrubku nebo otvoru do uzavřené ozvučnice. Signál vyzařovaný otvorem ven je ve fázi se signálem vyzařeným reproduktorem a podporuje jej. Velikosti rezonančního kmitočtu rezonátoru se volí stejně velká jako velikost rezonančního kmitočtu reproduktoru, což způsobí, že převážná část akustické energie je vyzařena plochou otvoru nátrubku. Při malých výchylkách reproduktoru dosáhneme výrazně malého nelineárního zkreslení.

Určení, zda je reproduktor vhodný pro umístění do bassreflexové ozvučnice, udává činitel EBP , pro který platí

$$EBP = \frac{f_r}{Q_{es}}, \quad (6.5)$$

kde f_r je rezonanční kmitočet a Q_{es} je elektrický činitel jakosti reproduktoru. Pokud je činitel $EBP < 50$, pak je lepší reproduktor umístit spíše do uzavřené ozvučnice. Tento činitel je ale spíše informativní a řídit se jím nemusíme.

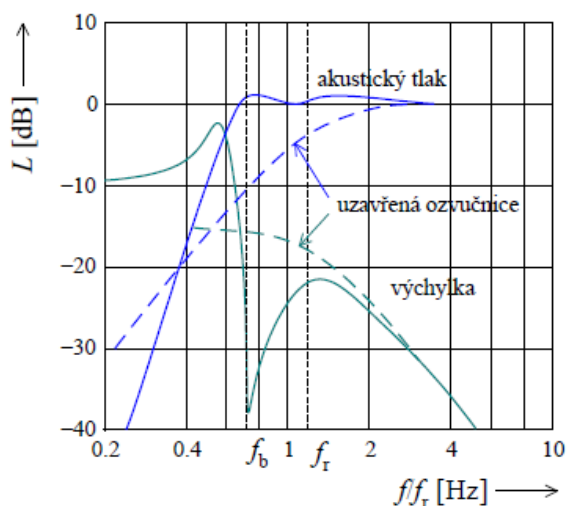
Díky analogicky–mechanickému obvodu (obr.6.4) si lze představit funkci bassreflexového nátrubku, kde je k pružině představující objem ozvučnice a reproduktoru přivěšená druhá pružina se závažím, která představuje chování bassreflexového nátrubku. Z hlediska elektromechanické analogie se lze na soustavu dívat jako na dva rezonanční obvody.



Obr. 6.4: Ozvučnice typu bassreflex a mechanicko-analogický obvod v kombinaci s reproduktorem cit. [5]

Použitím uzavřené ozvučnice s bassreflexem dosáhneme nového rezonančního kmitočtu f_b , pro nějž platí $f_b < f_c$ (obr.6.5). Při objemu ozvučnice V_b , průřezu nátrubku S a jeho délce l pak rezonanční kmitočet odpovídá [4]

$$f_b = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_b(l + 0,96\sqrt{S})}}. \quad (6.6)$$



Obr. 6.5: Změna akustického tlaku a výchylky membrány reproduktoru v uzavřené ozvučnici a ozvučnici typu bassreflex cit.[5]

Díky ozvučnici typu bassreflex lze dosáhnout nižšího spodního kmitočtu než u uzavřené ozvučnice. Nevýhodou je větší zkreslení, které je způsobeno větší výchylkou membrány reproduktoru a větší rychlostí proudění vzduchu v nátrubku. Při proudění

vzduchu nad 3 m.s^{-1} mohou vznikat na hranách nátrubku parazitní zvuky, které znepříjemňují poslech.

Umístění reprosoustavy s ozvučnicí typu bassreflex má své specifika. Jedno ze zásadních je, že před otvorem nátrubku nesmí být ve vzdálenosti 20 cm žádná překážka. Překážky v této vzdálenosti výrazně ovlivňují vyzařovací impedanci nátrubku.

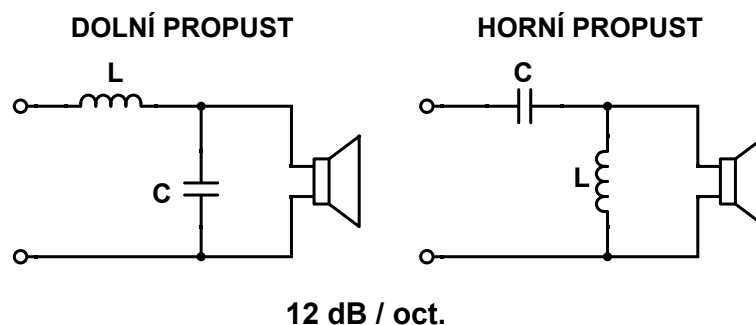
6.2 Kmitočtová výhybka

Hlavním účelem kmitočtové výhybky je frekvenčně rozdělit signál tak, aby každý typ reproduktorů v soustavě reprodukoval signál, pro který je sestrojen, a tím došlo k zamezení intermodulačního zkreslení a výkonového přetížení reproduktorů.

Výhybky dělíme podle místa použití a konfigurace na pasivní a aktivní a výkonové a nevýkonové. V klasických HiFi systémech používáme zejména pasivní, které se zařazují do výkonové části za zesilovač.

Kmitočtové výhybky se skládají z frekvenčních filtrů. Pro basové reproduktory se používá dolní propust, pro středotónové používáme pásmovou propust a pro vysokotónové filtr typu horní propust.

Důležitým faktorem při návrhu výhybky je použití vhodného řádu filtru. Nejčastěji jsou použity filtry 2. řádu, které mají strmost -12 dB/oct . Filtry 2. řádu jsou univerzální z hlediska šířky přechodného pásma a vyrovnané fázové charakteristiky v okolí dělicího kmitočtu. Při použití vyšších řádů obsahuje zapojení více součástek, čímž může dojít i k posunu fáze mezi jednotlivými frekvenčními pásmy.



Obr. 6.6: Schéma filtrů 2. řádu

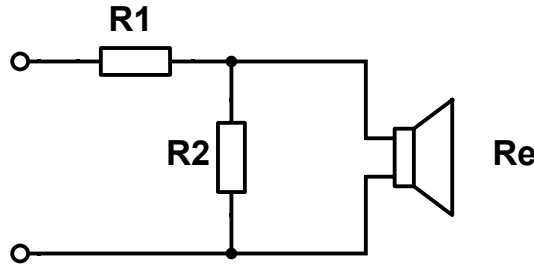
Pro výpočet hodnot cívky a kondenzátoru dolní a horní propusti slouží stejné vzorce

$$L = \frac{Z}{\pi f_d}, \quad (6.7)$$

$$C = \frac{1}{4\pi f_d Z}, \quad (6.8)$$

kde Z je impedance reproduktoru, kterému bude propust určena, a f_d je dělicí kmitočet.

Další důležitou částí reproduktorové výhybky bývá útlumový článek, díky kterému můžeme vyrovnat citlivost jednotlivých reproduktorů, zejména vysokotónového vůči reproduktorům určeným pro nižší frekvenční pásma, na stejnou hodnotu.



Obr. 6.7: Schéma děliče pro vyrovnání citlivosti reproduktoru

Pro výpočet velikosti rezistorů útlumového článku platí vzorce

$$R_2 = 10^{\frac{A}{20}} \frac{R_e}{1 - 10^{\frac{A}{20}}}, \quad (6.9)$$

$$R_{2e} = \frac{R_2 R_e}{R_2 + R_e}, \quad (6.10)$$

$$R_1 = R_e - R_{2e}, \quad (6.11)$$

$$A = 20 \frac{R_{2e}}{R_1 + R_{2e}}, \quad (6.12)$$

kde A je velikost útlumu a R_e je stejnosměrný odpor reproduktoru.

6.2.1 HRTF filtr

HRTF (Head-Related Transfer function) neboli přenosová funkce hlavy je funkce, která určuje způsob, jakým se zvuk dostává z určitého bodu v prostoru až k posluchačovým uším. Je založena na principu anatomie lidského sluchu a binaurálního slyšení. I když má každý jedinec odlišnou přenosovou funkci hlavy, lze určit standard,

který se používá při vytváření prostorových efektů zvuků ve 3D audio a modelování akustických vlastností uzavřených prostorů.

HRTF filtr je frekvenční filtr, který upravuje frekvenční spektrum tak, aby byly splněny podmínky přenosové funkce hlavy pro prostorový efekt zvuku, kterého chceme docílit. Dle specifikací Dolby Atmos jsou použity softwarové kmitočtové filtry, které jsou zabudovány v AV receiveru, a analogové filtry realizované z obvodů typu RLC obsažených v reproduktorových soustavách. Nastavení těchto filtrů se odvíjí od způsobu, jak má být zvuk vníman posluchačem.

Podle specifikací firmy Dolby Laboratories mají mít použité HRTF filtry v nahoru vyzařujících reproduktorech průběh frekvenční charakteristiky takový, že na středních kmitočtech bude filtr fungovat jako pásmová propust se středním kmitočtem 7 kHz a na vysokých kmitočtech bude filtr fungovat jako pásmová zadrž se středním kmitočtem 12 kHz (obr.6.8).

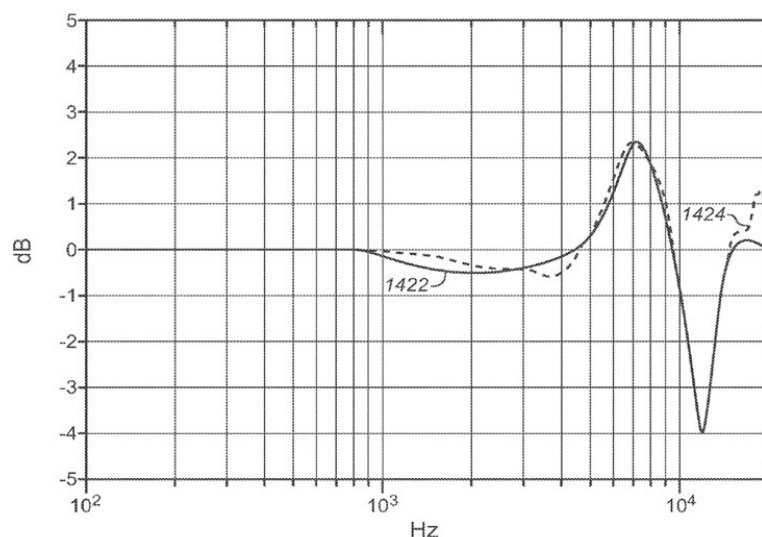
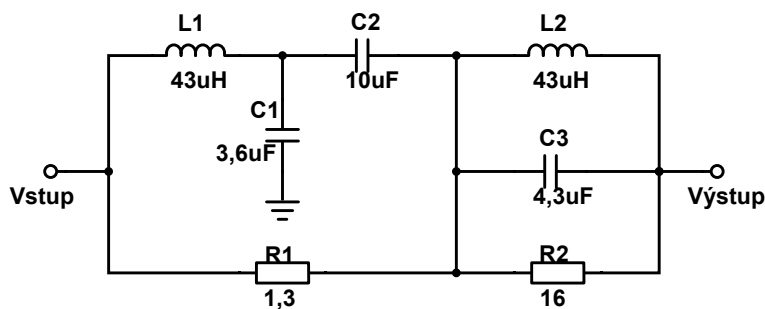


FIG. 14B

Obr. 6.8: Frekvenční charakteristika HRTF filtru cit.[6]

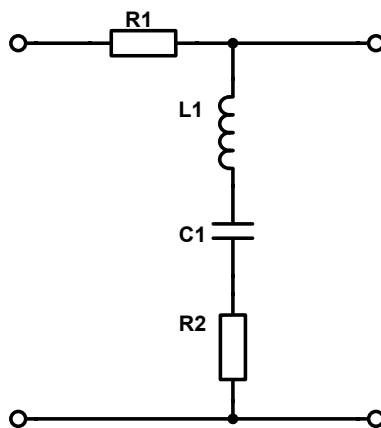


Obr. 6.9: Schéma HRTF filtru pro nahoru vyzařující reproduktory cit.[6]

6.2.2 Pásmová zádrž

Pásmová propust je lineární kmitočtový filtr, který nepropouští signál na frekvencích, pro které je nastaven. Pro konstrukci pásmových propustí používáme dvě topologie, a to pasivní a aktivní. Pasivní zapojení se skládá z pasivních součástek odporů, kondenzátorů a cívek. U pasivního zapojení dochází ke ztrátám způsobeným parazitními vlastnostmi pasivních prvků. Aktivní zapojení používá operační zesilovač, a ten zajistí, že ke ztrátám nedochází.

Schéma uvedené na obr. 6.10 je složeno z pasivních součástek, kde odpor R_1 nastavuje kvalitu filtru, cívka L_1 a cívka C_1 nastavují střední kmitočet a odpor R_2 tvoří společně s odporem R_1 odporový dělič a nastavují velikost útlumu pásmové zádrže na středním kmitočtu.



Obr. 6.10: RLC schéma pásmové zádrže

Pro výpočet hodnot součástek se zvolí hodnota kondenzátoru, nebo cívky a zbylé součástky se dopočítají dle vzorců

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}, \quad (6.13)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (6.14)$$

$$R_1 = \frac{L}{Q^2 C}, \quad (6.15)$$

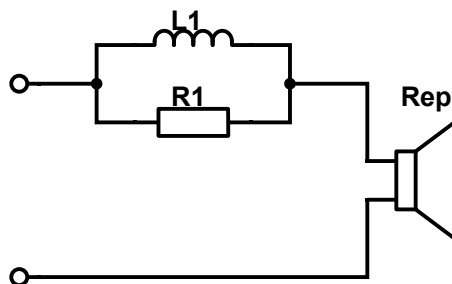
kde Q je kvalita filtru, f_0 střední kmitočet, f_1 a f_2 jsou kmitočty na hodnotách -3 dB vůči hodnotě f_0 .

6.2.3 Baffle step

Reproduktor při vysokých kmitočtech vyzařuje akustický signál přímo před sebe a při nízkých kmitočtech dochází k vyzařování akustických signálů za zadní stěnu

ozvučnice a to znamená, že reproduktor vyzařuje všesměrově. Tento efekt způsobí zesílení nízkých kmitočtů složením zvukových signálů za a před ozvučnicí. Korekce baffle step eliminuje tuto vlastnost reproduktoru a potlačuje nízké kmitočty vyzářené za zadní stranu reproduktoru.

Korekce baffle step je složena z paralelní kombinace cívky a rezistoru zapojené do signálové cesty sériově před reproduktor (obr. 6.11), kde indukčnost cívky určuje tlumené kmitočtové pásmo a rezistor velikost útlumu.



Obr. 6.11: Schéma zapojení korekce Baffle step

Pro výpočet hodnot součástek korekce slouží vzorce

$$f_3 = \frac{4560}{W_B}, \quad (6.16)$$

$$R = R_e(10^{\frac{dB}{20}} - 1), \quad (6.17)$$

$$L = \frac{R}{2\pi f_3}, \quad (6.18)$$

kde f_3 je kmitočet zadní vlny, W_B šířka ozvučnice, R_e stejnosměrný odpor a dB je požadovaný útlum.

6.2.4 Zobelova korekce

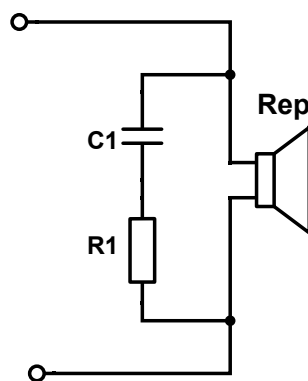
Cívka reproduktoru způsobuje na vyšších kmitočtech nárůst impedanční charakteristiky reproduktoru, čímž je ovlivněna výsledná kmitočtová charakteristika. Zobelova korekce slouží k neutralizaci indukčnosti cívky reproduktoru L_e a tím zabrání nárůstu impedanční charakteristiky na vyšších kmitočtech. Je tvořena sériovou kombinací kondenzátoru a rezistoru připojených paralelně k reproduktoru (obr. 6.12).

Pro výpočet hodnot použitých součástek slouží vzorce

$$R_1 = R_e \cdot 1,25, \quad (6.19)$$

$$C_1 = \frac{L_e}{R_1^2}, \quad (6.20)$$

kde L_e je indukčnost cívky a R_e stejnosměrný odpor reproduktoru.



Obr. 6.12: Schéma zapojení Zobelovy korekce

6.3 Stavební materiály

Hlavním požadavkem na materiál, ze kterého bude reproduktorová skříň vyrobena, je dostatečná tuhost. V dnešní době je k dispozici velké množství materiálů určených pro stavbu reproduktorových skříní, ale ne všechny jsou dostatečně vyhovující.

M.D.F. – Medium density fibre board: deska z tohoto materiálu má velkou hustotu, váhu a velké vnitřní tlumení. Díky svému provedení je její konečná povrchová úprava snadná a díky váze je skříň stabilní i při velkých úrovních hlasitosti. M.D.F je pevná a také těžká, takže se využívá spíše pro reproduktorové skříně domácího HiFi, kde velikost a váha nebývá tak velká, jako u profesionálních přenosných skříní.

D.T.D. – Dřevoláknitá deska: jedná se o nejvíce používaný materiál u reproduktorových skříní. Lisovaná deska se může použít ve stejných aplikacích jako M.D.F. Je lehčí, méně hustší a levnější než M.D.F. D.T.D a M.D.F nelze použít v prostorech, kde je vysoká vlhkost, jelikož se mohou poškodit. Odolnost vůči M.D.F je větší než u D.T.D, ale přesto se nepoužívají ve venkovních prostorech. Jako nejčastější tloušťka se používá 18, 20 nebo 25 mm.

Překližka z břízy: je to středně těžký, silný a tuhý materiál. Jeho vnitřní tlumení nedosahuje kvalit jako M.D.F. Překližka z břízy je nejdražší a nejodolnější používaný materiál pro stavbu reproduktorových skříní, hlavně profesionálních. Díky svým vlastnostem je používána zejména pro mobilní systémy, které jsou namáhány stěhováním a jsou používány ve venkovním prostředí.

Překližka z topolu: je lehká, silná a levnější než překližka z břízy. Používá se pro reproduktorové skříně, u kterých nejsou kladeny tak vysoké nároky na kvalitu, a upřednostňuje se především lehčí manipulace a finanční úspory při stavbě. Překližky ale mívají uvnitř prázdná místa, která jsou způsobena chybějícími částicemi při výrobě. To může někdy zapříčinit rezonance a zvonivý zvuk. Tato místa jsou obtížná k nalezení.

Vícejádro: (multi core) je nový materiál a jeho aplikace je možná pro každou

situaci, v které můžeme použít překližku z topolu. Její váha je těžší, má stejnou cenu, neobsahuje defektivní prázdná místa a lépe v ní drží vruty.

Lamináty: mohou snížit rezonance skříně. Dohromady slepené dva nebo tři pláty rozdílného druhu jsou velkou pomocí. Jednotlivé materiály s různými rezonančními vlastnostmi si navzájem pomáhají odstranit možné vibrace. Přílnavost mezi dřevem pomáhá snížit rezonance za pomoci izolace a dobrého vnitřního tlumení. Největším problémem je zajistit přílnavost mezi deskami v kterémkoli místě. Výhodou je nízká hmotnost a tloušťka takto vzniklé desky.

Beton: je silný, tuhý a těžký materiál. Jeho předností je vysoká tuhost a nevýhodou vysoká váha. V praktickém použití by bylo možné betonovou reproduktorovou skříň použít jen pro malé HiFi reprosoustavy. V praxi se volí spíše vestavenění reproduktorů do zdi.

Kámen: je tvrdý, těžký, ale má tendenci zvonit. Používá se břidlice, pískovec, žula, mramor a vápenec. Zvonivost se musí tlumit použitím dalšího materiálu.

A.B.S-plast: výhodou je dobrá výrobní reprodukovatelnost, i když za větší cenu vstřikovací formy. Využívá se v malých satelitních reprosoustavách pro plošné ozvučení a lacinější auto subwooferech.

Injektovaná celulóza: celulóza je strojově injektovaná tvrdidlem, které se uvnitř roztahuje. Hlavně v případě konstrukcí kruhových ozvučnic je tento materiál díky větší tuhosti a tvrdosti lepší než dřevotřísková deska.

7 POROVNÁNÍ STÁVAJÍCÍCH ŘEŠENÍ NAHORU VYZAŘUJÍCÍCH REPRODUKTORŮ

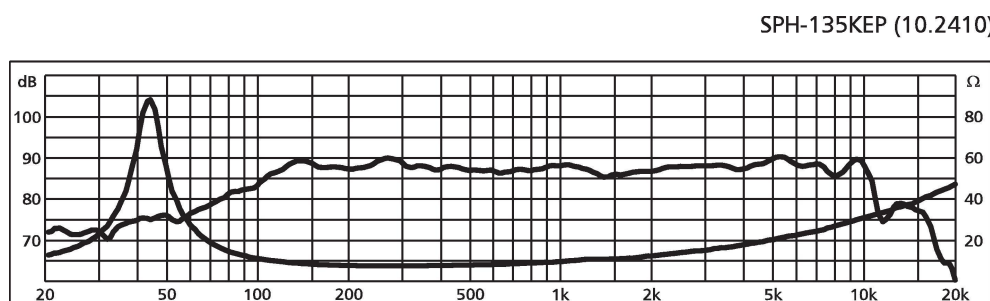
Model	Frekvenční rozsah	Citlivost	Impedance	Doporučený výkon zesilovače	Systém
–	Hz – kHz	dB	Ω	W	–
Atlantic Tech 44-DA	150 – 20	–	6	10 – 100	Koaxiální
Def Tech A60	200 – 15	85	–	≤ 100	3"středový
Onkyo SKH-410	90 – 20	84	6	≤ 100	Koaxiální
KEF R50	96 – 19,5	85	8	25 – 100	Koaxiální
Klipsch RP-140SA	–	–	8	–	Dvoupásmový
Pioneer SP-T22A-LR	–	–	–	≤ 80	Koaxiální
Elac A4	180 – 20	85	6	–	Koaxiální
NHT Atmos Mini	120 – 20	87	6	25 – 100	3"středový
Martin Logan AFX	90 – 20	87	4	20 – 200	-
TRIAD In-Room Bronze Height Module	180 – 20	89	6 Ω	50 – 200	4x2"
TRIAD In-Room Silver Height Module	130 – 20	89	6 Ω	50 – 200	4x3"
Definitive Technology A90	86 – 40	89,5	–	–	Dvoupásmový
PSB Imagine XA A90	100 – 23	87	–	10 – 80	Dvoupásmový

8 VÝBĚR MĚNIČŮ DLE POŽADOVANÝCH PARAMETRŮ

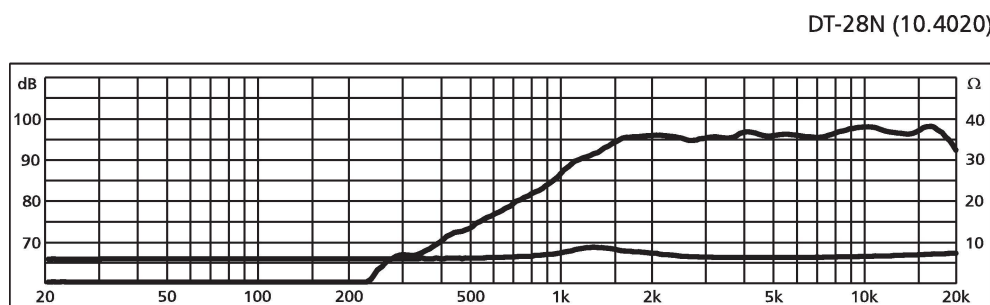
Prozkoumáním možných variant použitých elektroakustických měničů v již stávajících řešeních nahoru vyzařující reproduktorů jsme zjistili, že lze využít širokopásmové měniče, středobasové měniče a kombinaci výškového a středobasového, popřípadě basového měniče.

Kvalitní širokopásmové měniče, které by vyhovovaly požadavkům Dolby Atmos, dosahují vysokých cen a jejich použití v páru by bylo vysoce nákladné. Samostatné středobasové měniče nedosahují čisté produkce ve vyšším kmitočtovém pásmu, a proto jsem zvolil kombinaci středobasového a výškového měniče.

Pro produkci spodního kmitočtového pásma jsem vybral středobasový reproduktor Monacor SPH-135KEP. Tento reproduktor má vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku (obr.8.1) v oblasti 120–3000 Hz a nízké kmitočty od 100 Hz dokáže produkovat i bez použití ozvučnice typu bassreflex. Jako vysokotónový reproduktor jsem zvolil Monacor DT-28N. Díky své vyrovnané kmitočtové charakteristice (obr. 8.2) v rozsahu 2–20 kHz bude sloužit pro reprodukci signálu vyššího frekvenčního pásma. Kombinací těchto dvou reproduktorů dosáhneme pokrytí požadovaného frekvenčního pásma dle požadavků Dolby Atmos v rozsahu 180–20000 Hz.



Obr. 8.1: Impedanční a kmitočtová charakteristika měniče Monacor SPH-135Kep



Obr. 8.2: Impedanční a kmitočtová charakteristika měniče Monacor DT-28N

9 MĚŘENÍ REÁLNÝCH VLASTNOSTÍ REPRODUKTORŮ

Pro objektivní návrh reproduktorové ozvučnice a kmitočtové výhybky je zapotřebí zjistit reálné vlastnosti reproduktorů, které použijí. Reálné vlastnosti se mohou lišit od parametrů udávaných výrobcem. To může zapříčinit nepřesný návrh a špatnou funkci nahoru vyzařující reproduktorové soustavy.

Jedná se zejména o Thiele-Smallovy parametry, ze kterých se provádí výpočet objemu ozvučnice. Tyto parametry se určují na základě hodnot impedanční a fázové charakteristiky reproduktoru použitého pro reprodukci spodního kmitočtového pásma, protože vysokotónový reproduktor nehraje roli při výpočtu objemu ozvučnice. Dále je zapotřebí změřit frekvenční charakteristiky obou reproduktorů, z nichž provedeme návrh kmitočtové výhybky.

9.1 Měření impedanční charakteristiky

Měření impedanční a fázové charakteristiky probíhalo v laboratořích VUT SC5.50. Pro měření jsem zvolil metodu měření napětí a proudu protékajícího reproduktorem, kde byl proud měřen jako napětí na normálovém rezistoru s nízkou hodnotou odporu. Normálový rezistor byl zapojen sériově k měřenému reproduktoru. Jako měřicí jednotka byl použit elektroakustický analyzátor s generátorem NTi Audio RT-2B, kde bylo na jeho vstupy přivedeno napětí na reproduktoru a normálovém rezistoru. Pomocí programu RTEVAL, který ovládá měřicí analyzátor, byly naměřeny impedanční a fázové charakteristiky středobasového i výškového reproduktoru. Reprodukory během měření ležely na antivibrační podložce tak, aby vyzařovaly směrem kolmo vzhůru.

Naměřené hodnoty byly zobrazeny do grafů A.1 a A.2, ze kterých lze zjistit, že impedanční charakteristiky nejsou shodné s charakteristikami reproduktorů uvedenými výrobcem, které jsou zobrazeny v kapitole 8. Dále bylo zjištěno, že středobasové reproduktory se mezi sebou liší v rezonančním kmitočtu, což může být příčinou rozdílného průběhu výsledných kmitočtových charakteristik.

9.2 Výpočet Thiele-Smallových parametrů

Thiele-Smallovy, dále TS parametry, slouží k definování elektromechanických parametrů reproduktorů definujících nízkofrekvenční chování elektroakustických měničů v oblasti rezonančního kmitočtu. Díky těmto parametrům lze provádět simulace a následný návrh ozvučnice.

Při běžných laboratorních podmínkách lze určit z naměřené impedanční charakteristiky měniče tyto základní parametry: maximální impedanci za rezonance Z_{\max} , stejnosměrný odpor R_v a impedanci na kmitočtech f_1 a f_2 , které odpovídají poklesu elektrické impedance na hodnotu

$$R_1 = R_v \sqrt{R_0}, \quad (9.1)$$

kde $R_0 = \frac{Z_{\max}}{R_v}$. Na základě těchto parametrů a vzorců byly dopočteny hodnoty elektrického činitele jakosti Q_{Es} , mechanického činitele jakosti Q_{Ms} a celkového činitele jakosti Q_s . Tyto parametry určíme z rovnic

$$Q_{\text{Es}} = \frac{Q_{\text{Ms}}}{R_0 - 1}, \quad (9.2)$$

$$Q_{\text{Ms}} = \frac{\sqrt{R_0}}{f_1 - f_2}, \quad (9.3)$$

$$Q_s = \frac{Q_{\text{Es}} Q_{\text{Ms}}}{Q_{\text{Es}} + Q_{\text{Ms}}}. \quad (9.4)$$

Z impedanční charakteristiky lze dále vypočítat indukčnost cívky reproduktoru

$$L_v = \frac{\sqrt{Z_0^2 - R_v^2}}{2\pi f_0}, \quad (9.5)$$

kde Z_0 je impedance měniče na kmitočtu f_0 , přičemž kmitočet f_0 se musí co nejvíce blížit hodnotě 1 kHz.

Výsledné hodnoty TS parametrů pro oba použité reproduktory jsou porovnány v tabulce 9.1 společně s hodnotami udanými výrobcem.

		Repro 1	Repro 2	Katalogová hodnota
R_v	Ω	6,6	6,6	6
f_r	Hz	45	43	45
Q_{Ms}	–	4,99	6,24	5,54
Q_{Es}	–	0,42	0,37	0,32
Q_s	–	0,39	0,35	0,30
L_v	mH	0,99	1,11	0,75

Tab. 9.1: Porovnání TS parametrů měniče SPH-135Kep

Ostatní TS parametry se odvíjejí od mechanických vlastností reproduktorů a nelze je ověřit běžným měřením. Proto budou v dalších krocích použity hodnoty udané výrobcem.

9.3 Měření frekvenční charakteristiky

Pro získání představy průběhu reálných frekvenčních charakteristik, z kterých lze určit postup při návrhu kmitočtové výhybky, byly změřeny všechny čtyři použité reproduktory. Měření jsem provedl v bezodrazové místnosti v laboratoři SC5.50, kde je kritický kmitočet 100 Hz. Z důvodu nerovnoměrného rozložení energie zvukových vln nejsou změřené výsledky pod tímto kmitočtem validní.

K měření byl použit měřicí systém Pulse, který se skládá z hardware LAN-XI obsahujícího výstupy generátoru a mikrofonní vstupy a ovladačího softwaru LabShop. Reproduktory byly zavěšeny na lankách a v jejich ose byl umístěn měřicí mikrofon ve vzdálenosti jeden metr.

Mnou naměřené průběhy charakteristik jsou vyneseny do grafů A.3 a A.4. Průběh vysokotónového reproduktoru je shodný s průběhem udávaným výrobcem, ale velký rozdíl nastává u průběhu středobasového reproduktoru. U obou středobasových reproduktorů vzniká na kmitočtu 1600 Hz rezonance, která způsobí nevyrovnanost výsledné kmitočtové charakteristiky.

Tím, že reproduktory byly měřeny ve volném poli kmitočtové charakteristiky středobasového reproduktoru, jsou pouze orientační, protože průběh charakteristiky bude značně ovlivněn rozměry ozvučnice v které bude umístěn. Charakteristika výškového reproduktoru nebude již ovlivněna rozměry ozvučnice, ale v jejím průběhu budou hrát velkou roli přesahující boky ozvučnice, které budou fungovat jako akustické stínění.

10 NÁVRH OZVUČNICE

Ozvučnice je sestrojena dle požadavků z M.D.F překližky o tloušťce 18 mm, která díky své velké vnitřní hustotě a velkému vnitřnímu tlumení vyhovuje mým účelům nejlépe. Půdorys podstavy je 299×199 mm a zaoblení jejích vnějších hran má radiusu 9 mm, tyto rozměry byly zadaný společně s tlouškou ozvučnice tak, aby seděly k již stávající konfiguraci reproduktorů 5.1, ke které jsou námi navrhované nahoru vyzařující reproduktory určeny. Pro splnění požadavků pro projekci stropního kanálu za pomoci nahoru vyzařujících reproduktorů musí být vrchní část ozvučnice zkosená pod úhlem 20°. Tento úhel zajistí nasměrování akustického signálu vyzařovaného nahoru vyzařující reproduktorovou soustavou na strop tak, aby byly splněny požadavky dle patentu pro vícekanálové systémy Dolby Atmos.

10.1 Objem ozvučnice

Objem ozvučnice byl stanoven dle TS parametrů středobasového reproduktoru Manacor SPH-135KEP, které byly dosazeny do vztahu pro výpočet objemu uzavřené ozvučnice

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1}, \quad (10.1)$$

kde V_b je vypočítaný objem uzavřené ozvučnice, V_{as} ekvivalentní objem a Q_{ts} celkový činitel jakosti reproduktoru, který udává výrobce. Q_{tc} je celkový činitel jakosti reproduktoru v ozvučnici, jehož hodnota se volí v závislosti na požadované aproximace modulové kmitočtové charakteristiky. Pro výpočet objemu byly použity aproximace typu Butterworth, Bessel a Linkwitz-Riley, jejichž výsledky jsou shrnuty v tab. 10.1.

	Q_{tc}	V_b
Aproximace	-	1
Butterworth	0,707	3,4
Bessel	0,577	5,93
Linkwitz-Riley	0,5	8,71

Tab. 10.1: Tabulka objemů uzavřené ozvučnice

V úvahu byla brána také možnost použití ozvučnice typu bassreflex, jejíž objem se určuje podobně jako u uzavřené ozvučnice z TS parametrů středobasového

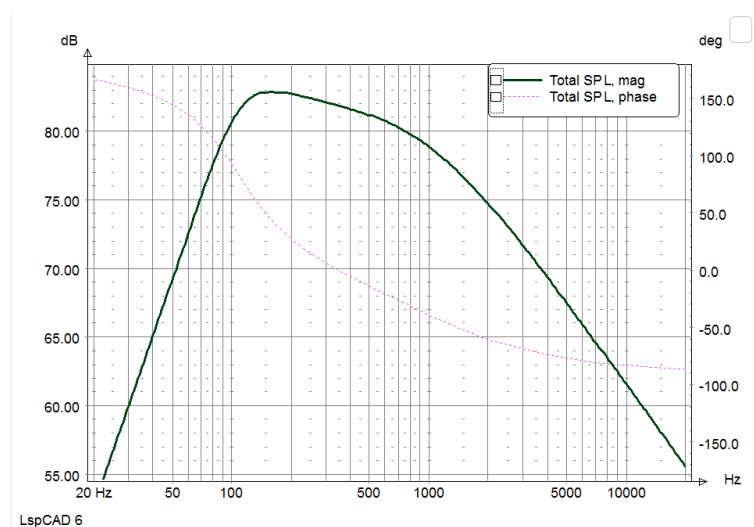
reproduktoru a ze vzorce pro výpočet objemu ozvučnice typu bassreflex

$$V_b = 15,33V_{as}Q_{ts}^{2,86}, \quad (10.2)$$

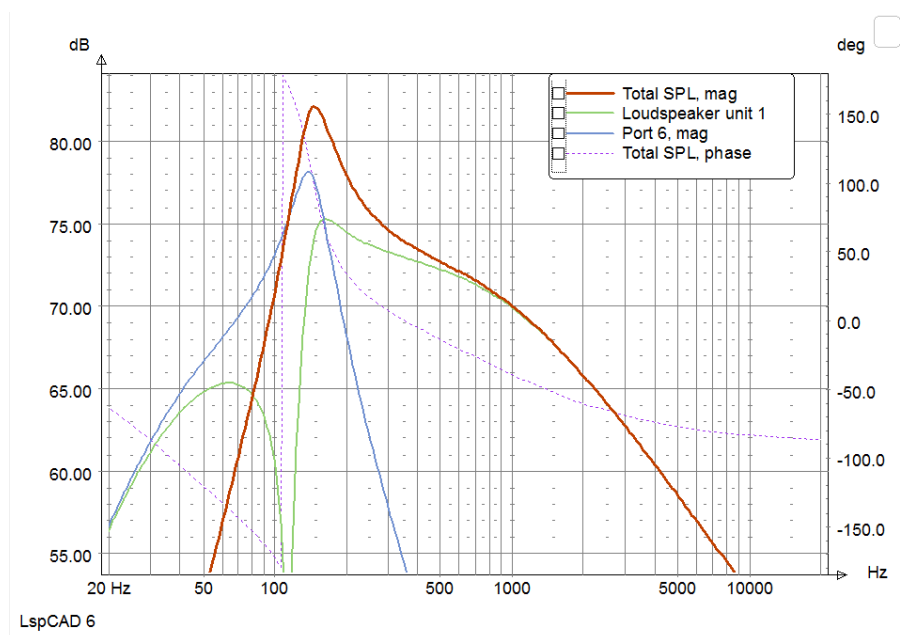
kde V_b je vypočítaný objem uzavřené ozvučnice, V_{as} ekvivalentní objem a Q_{ts} celkový činitel jakosti reproduktoru, tyto parametry jsou udávány výrobcem. Po dosazení do vzorce vyšel objem bassreflexové ozvučnice 7,59 litrů.

Aby reproduktorová soustava působila esteticky a zapadla do již stávajících 5.1 konfigurací, byla stanovena maximální výška ozvučnice 18 cm. Tím se nám maximální vnitřní objem ozvučnice zmenšil na 4,28 l. Dále bylo potřeba brát v potaz objem reproduktorů a kmitočtové výhybky, který byl stanoven na 0,9 l a tím se nám čistý vnitřní objem reproduktorové ozvučnice zmenšil na 3,38l. Tento objem se nám takřka shoduje s teoretickou hodnotou objemu uzavřené ozvučnice při použití Butterwothovy aproximace, ale z teoretickou hodnotou objemu ozvučnice typu bassreflex se liší o 3.31 litrů.

V programu LspCAD 6.0 byly provedeny simulace uzavřené (obr.10.1) a bassreflexové ozvučnice (obr.10.2) s vnitřním objemem ozvučnice 3,38l a reálnými TS parametry středobasového reproduktoru. Ze simulací je znatelné, že použití ozvučnice typu bassreflex nemá při tomto vnitřním objemu žádné významné opodstatnění. Pro ozvučnici typu bassreflex je zapotřebí použít větší objem ozvučnice, který společně s bassreflexovým nátrubkem posune spodní mezní kmitočet níž. Pro uzavřenou ozvučnici vychází mezní spodní kmitočet na 95 Hz. Tato hodnota je dostatečná protože dle specifikací Dolby Atmos produkují kmitočty od 180 Hz a o nižší kmitočty se stará subwoofer, tudíž uzavřená ozvučnice o objemu 3,38l je v našem případě dostačující.



Obr. 10.1: Graf simulace uzavřené ozvučnice s objemem 3,38 l



Obr. 10.2: Graf simulace bassreflexové ozvučnice s objemem 3,38 l

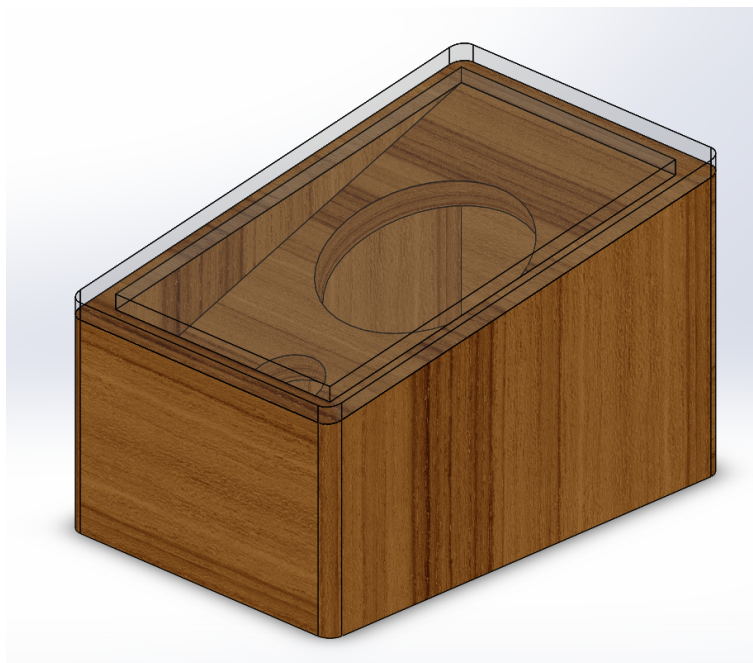
10.2 Konstrukce ozvučnice

Konstrukce ozvučnice je tvořena základní uzavřenou ozvučnicí pod úhlem 20° a převyšujícími bočnicemi ozvučnice, které jsou pod úhlem 10° od nejvyššího bodu ozvučnice (obr.10.3), tím dosáhneme akustického stínu, který ovlivní vyzařující úhel reproduktorové soustavy.

Středobasový reproduktor je umístěn v horní části a vysokotónový reproduktor je umístěn ve spodní části, kde je nejvíce ovlivněn akustickým stínem bočnic, které způsobí úzký vyzařovací úhel reproduktorové soustavy na vyšších kmitočtech. Nízké kmitočty není potřeba tolik tlumit, protože nejsou tolik důležité pro efekt příchozího zvuku shora.

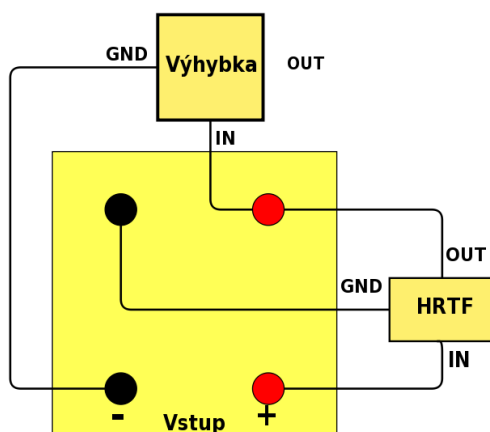
Další důležitou částí je akustický molitan umístěný na převyšující bočnice. Bez molitanu dochází k difrakci akustických vln za hranou bočnice a společně s odraženými vlnami deformují výslednou kmitočtovou charakteristiku reproduktorové soustavy. Molitanem je tedy vyplněn celý prostor okolo reproduktoru a i mezi nimi tak, aby molitan byl umístěn kolmo k reproduktorům.

Jelikož jsou reproduktory umístěny směrem nahoru, je zde velké riziko usedání prachu a vniku cizích objektů, tímž by mohlo dojít k poškození reproduktorů. Tento problém je vyřešen přidáním rámečku potaženým akusticky prostupnou tkaninou na vrchní část reproduktorové soustavy. Tento rámeček je připevněn na rychlo upínacích úponech, díky kterým můžeme rámeček kdykoliv sundat a dostat se k reproduktorům a provádět údržbu.



Obr. 10.3: 3D model reproduktorové soustavy

Na zadní straně je miska s konektory pro připojení. Zvolená miska obsahuje čtyři konektory a to z důvodu, aby bylo možno přivést signál před HRTF filtr nebo až za něj a tím jeho funkci vyřadit. Blokové schéma zapojení konektorů je popsáno na (obr. 10.4). Při přivedení signálu do spodní pravé kladné zdičky a propojení záporných zdiček svorkou je vstupním signál ovlivněn HRTF filtrem. Při přivedení signálu do horní kladné a spodní záporné zdičky a odstranění propojovací svorky je HRTF filtr odpojen.



Obr. 10.4: Blokové schéma možností zapojení

11 NÁVRH KMITOČTOVÉ VÝHYBKY

Pro přesný návrh kmitočtové výhybky bylo zapotřebí znát reálné kmitočtové charakteristiky reproduktorů v použité ozvučnici. Do ozvučnice vyrobé dle návrhu popsaného v kapitole 10 byly postupně vsazeny a změřeny oba středobasové reproduktory a výškové reproduktory. Měření jsem provedl v bezodrazové komoře za stejných podmínek, které jsou popsány v kapitole 9.3. Zjištěné kmitočtové charakteristiky (obr. A.5 a A.6) byly vyexportovány a použity v simulačním programu LspCAD 6.0, ve kterém probíhal kompletní návrh výsledné kmitočtové výhybky.

Při návrhu kmitočtové výhybky se vycházelo ze zapojení výhybky DN-20, kterou nabízí firma Monacor přímo ke svým reproduktorům. Toto zapojení jsem modifikoval tak, aby jsem dosáhl co nejvyrovnanější výsledné kmitočtové charakteristiky a mohl použít velikosti na trhu dostupných součástek. Kromě samotné kmitočtové výhybky, která rozděluje signál reproduktorům, je před ní zařazen HRTF filtr jehož zapojení je převzato z patentu pro nahoru vyzařující reproduktory od firmy Dolby Laboratories

11.1 Analýza reálných vlastností reproduktorů

Z naměřených kmitočtových charakteristik jsem zjistil, že výškové reproduktory nebude potřeba kromě korekce citlivosti nijak zvlášť korigovat. Nevyrovnanost kmitočtové charakteristiky byla způsobena přesahujícími hranami ozvučnice, které během měření nebyly nijak odtlumené a tím docházelo k deformaci na některých kmitočtech. Tyto propady v průběhu charakteristiky byly zanedbány.

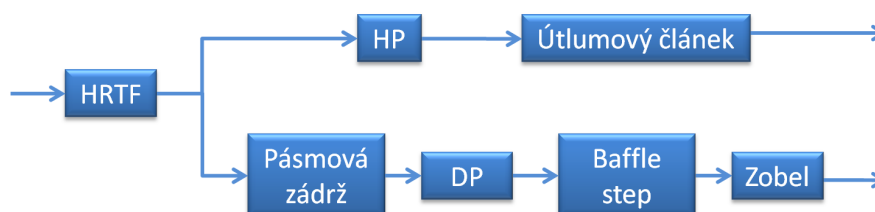
U středobasových reproduktorů jsem musel přidat pomocné obvody, které pomohly vyrovnat výslednou kmitočtovou charakteristiku. Největším problémem zvoleného reproduktoru je rezonance, která způsobí nárůst a následný pokles hlasitosti se středním kmitočtem na 1600 Hz. Protože oba měřené středobasové reproduktory se chovaly takřka stejně, bude mít toto chování kořeny již ve výrobě reproduktorů samotných. Jelikož v charakteristikách udávaných výrobcem toto chování není popsáno nemohl jsem ho zohlednit při výběru reproduktorů a musel jsem s ním pracovat. K odstranění této špičky bylo použito RLC pásmové zádrže, která nám ji takřka odstranila za cenu ovlivnění fázové charakteristiky a výsledné velikosti výhybky. Jako další krok bylo potřeba snížit zdvih, který je v kmitočtovém pásmu 200–900 Hz a vzniká díky vlnám vyzářených za membránou. K tomu nám posloužila korekce baffle step. Zobelova korekce zůstala dle originálního zapojení DN-20.

Pro volbu dělicího kmitočtu jsme zvolili výrobcem doporučený dělicí kmitočet výškového reproduktoru 2000 Hz, který se nám po změně velikosti dostupných součástek mírně posunul směrem dolů. Tento dělicí kmitočet byl zvolen i na základě

nechtěné rezonance na 1600 Hz. Takto nastavená dolní propust se strmostí 12 dB na dekádu v kombinaci s pásmovou zadrží vyhladí průběh výsledné kmitočtové charakteristiky.

11.2 Konstrukce kmitočtové výhybky

Po provedení analýzy naměřených charakteristik reproduktorů v ozvučnici je mnou sestavená kmitočtová výhybka složená z následujících korekčních částí: HRTF filtru, pásmové zadrž, horní propusti s útlumovým článkem a dolní propusti se Zobelovou korekcí a Baffle stepem. Blokové schéma kmitočtové výhybky je zobrazeno na obr. 11.1



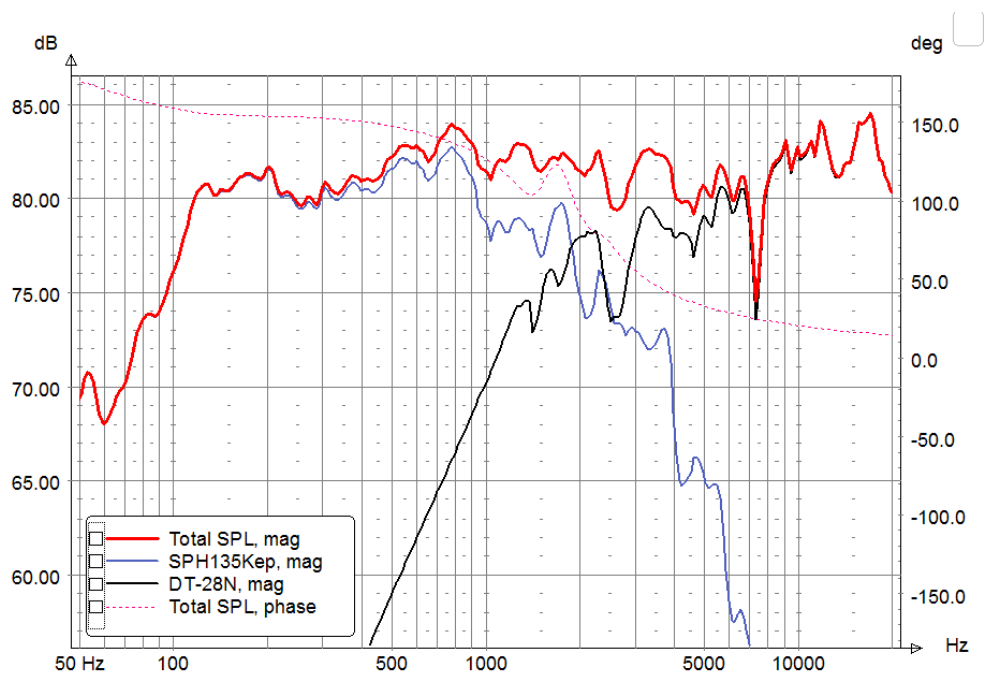
Obr. 11.1: Blokové schéma kmitočtové výhybky

Naměřené kmitočtové a impedanční charakteristiky reproduktorů v ozvučnici byly importovány do programu LspCAD 6.0, v kterém probíhaly všechny simulace. Charakteristika výškového reproduktoru byla změřená bez tlumení bočnic ozvučnice, a to způsobilo její nevyrovnanost díky vzniklým disfrakcím. Tyto propady v charakteristice byly při návrhu zanedbány.

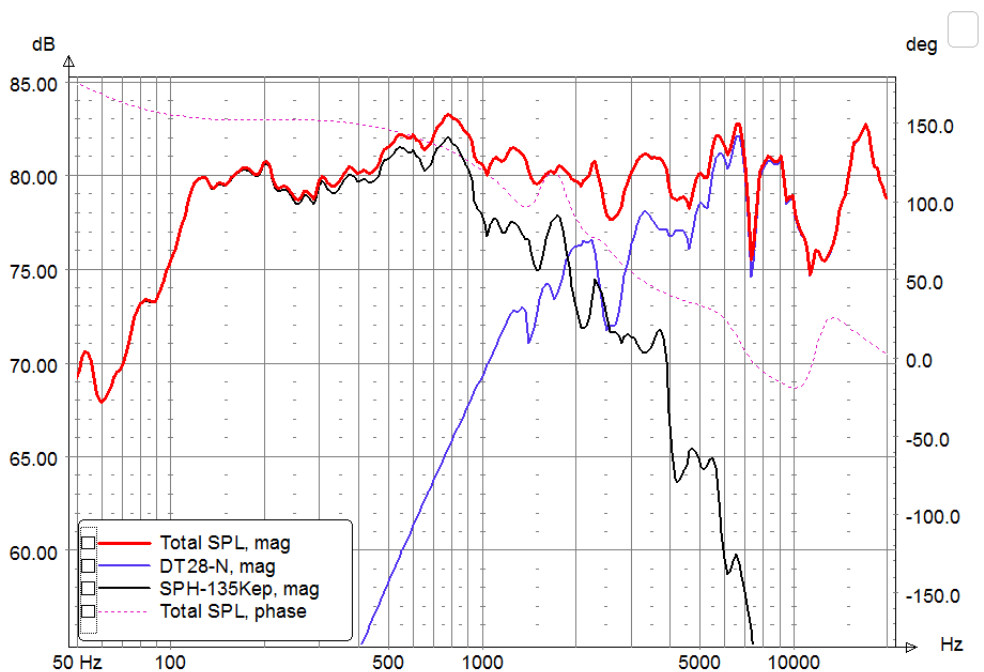
Na základě simulací byla odladěna výhybka přesně na míru námi použitým reproduktorům tak, aby jsme docílili co nejvyrovnanější výsledné kmitočtové charakteristiky za použití pasivních korekcí a součástek dostupným na trhu. Odsimulovaný výsledný průběh (obr. 11.3) je dle odladěného a finálního schématu zapojení (obr.A.7) námi navrhnuté a následně zkonstruované výhybky.

Kmitočtová výhybka je rozdělená na tři samostatné desky plošných spojů, které jsou rozděleny na DPS s HRTF filtrem, DPS s horní propustí a DPS s dolní propustí. Toto rozdělení jsem provedl z důvodu, že díky přidaným korekčním obvodům by výhybka nabývala velkých rozměrů a nastal by problém s její montáží uvnitř soustavy. Díky tomuto rozdělení jsem docílil jednodušší manipulace při montáži, případné demontáži a opravy, kdy k ní je přístup skrze otvor středobasového reproduktoru nebo otvorem misky, a nemusíme sundávat celou reproduktorovou ozvučnici. Další výhoda tohoto rozdělení je jednoduché zapojení konektorů tak, aby šel vyřadit obvod

HRTF filtru a reproduktorová soustava se dala používat i pro běžné audio aplikace. Návrh desek plošných spojů probíhal v programu KiCad.



Obr. 11.2: Simulace kmitočtové výhybky bez HRTF



Obr. 11.3: Simulace kmitočtové výhybky s HRTF

12 MĚŘENÍ REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Po osazení ozvučnice zvolenými reproduktory a kmitočtovou výhybkou s HRTF filtrem bylo provedeno měření kmitočtové a směrové charakteristiky. Dále jsem změřil impedanční a fázovou charakteristiku, díky kterým jsem si ověřil změřenou hodnotu stejnosměrné impedance zhotovené reproduktorové soustavy R_e .

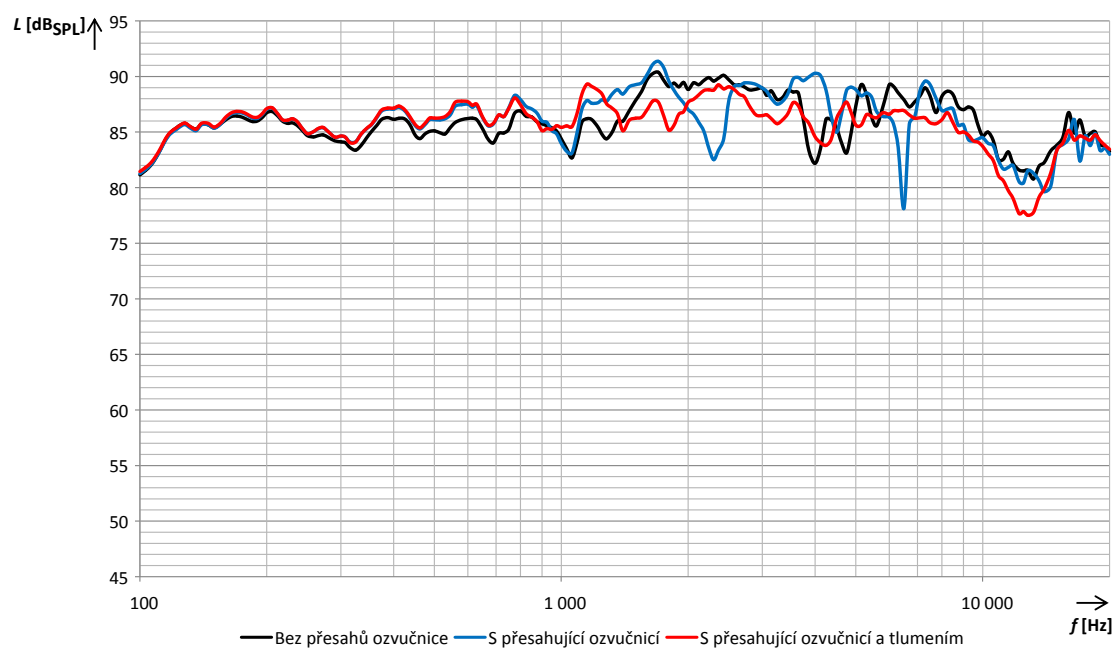
K měření byl použit prototyp reproduktorové ozvučnice, na kterém jsem si mohl ověřit správně zvolené parametry před vyrobou finálního produktu. Prototyp byl sestaven tak, aby přesahující okraje ozvučnice, které tvoří akustický stín, byly odjímatelné a dal se tak změřit jejich vliv na výslednou frekvenční a směrovou charakteristiku.

12.1 Měření frekvenční charakteristiky

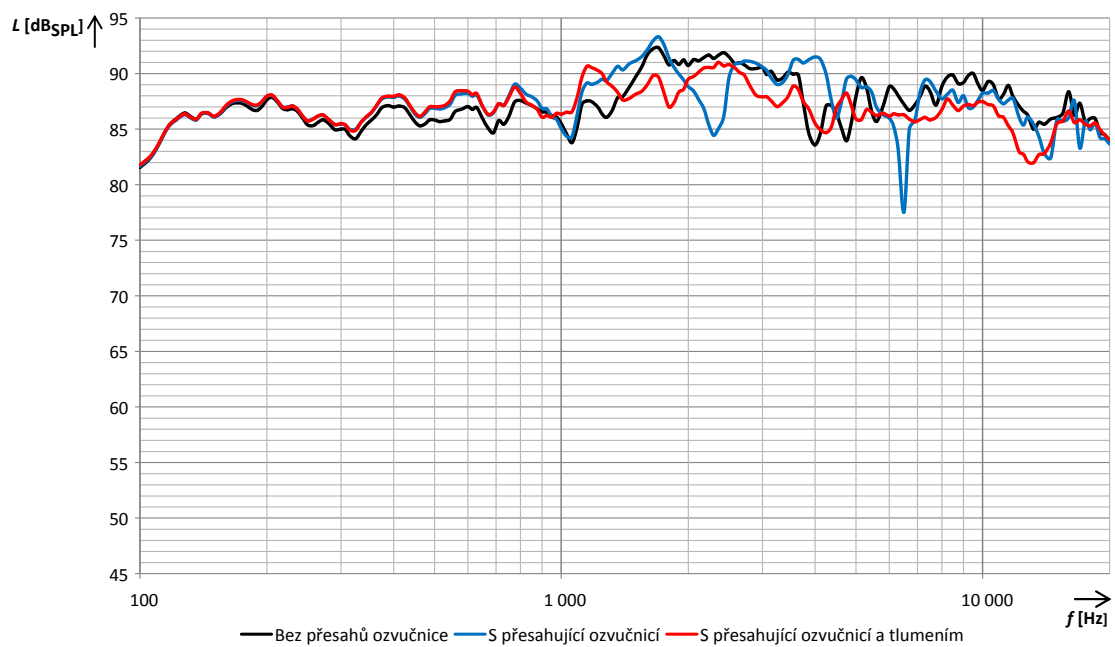
Měření frekvenční charakteristiky proběhlo v laboratoři SC5.50. Reproduktorová soustava byla umístěna do bezodrazové místnosti a za pomoci měřicího řetězce popsaného v kapitole 9.3, kde měřicí mikrofón byl umístěn mimo osu reproduktorové soustavy. Kmitočtové charakteristiky byly změřeny s použitím HRTF filtru před kmitočtovou výhybkou a bez HRTF filtru. Tím jsem si mohl ověřit, jak moc HRTF filtr ovlivní výslednou charakteristiku navržené reproduktorové soustavy. Tyto dvě kombinace byly změřeny pro ozvučnici bez přesahujících okrajů, s přesahujícími okraji bez obložení akustickým molitanem a s vnitřními okraji obloženými akustickým molitanem, který zabrání odrazu zvukových vln a deformaci kmitočtové charakteristiky.

Změřené hodnoty jsem vynesl do grafů zobrazených na obr.12.1 a 12.2. Z grafů lze ověřit správnou funkci kmitočtové výhybky s HRTF i bez HRTF filtru. Dále je na nich patrný vliv okrajů ozvučnice a tlumení, kdy nejvyrovnanější kmitočtová charakteristika je právě v kombinaci přesahujících okrajů ozvučnice s tlumením.

Zvolený vnitřní objem ozvučnice 4,28 litrů při maximální výšce 18 cm je pro reproduktorovou soustavu určenou pro projekci stropního kanálu v systémech Dolby Atmos dostačující díky dodržení požadavků společnosti Dolby Laboratories na frekvenční rozsah nahoru vyzařujících reproduktorů od 120 Hz do 20 kHz, které dle naměřených charakteristik splňuje, a není potřeba jej rozšiřovat směrem dolů ani nahoru.



Obr. 12.1: Kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy s HRTF



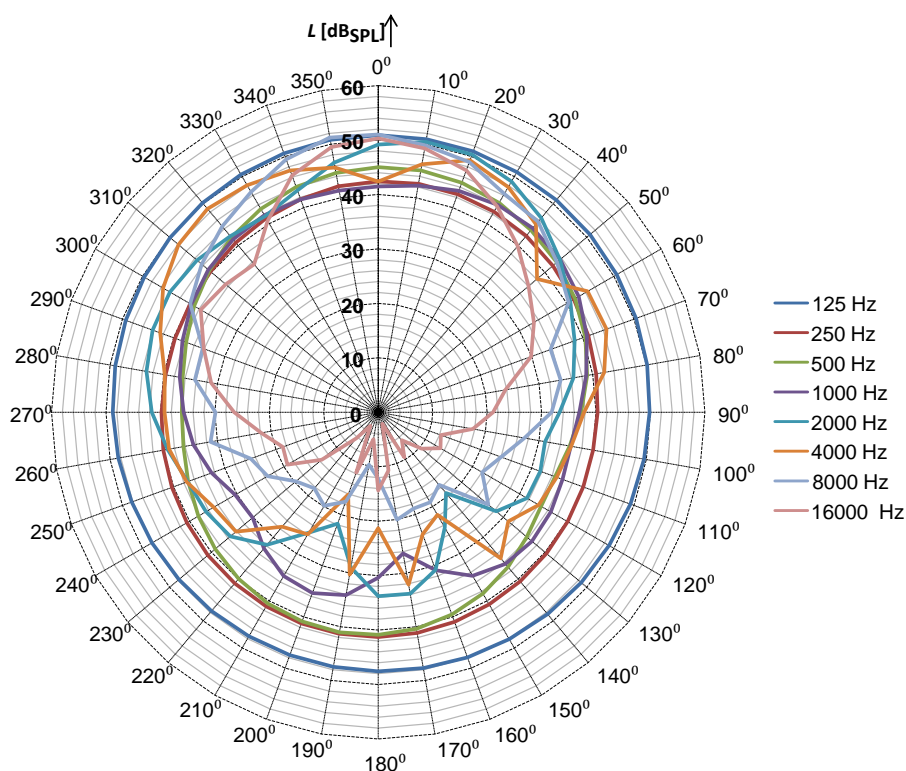
Obr. 12.2: Kmitočtová charakteristika reproduktorové soustavy bez HRTF

12.2 Měření směrové charakteristiky

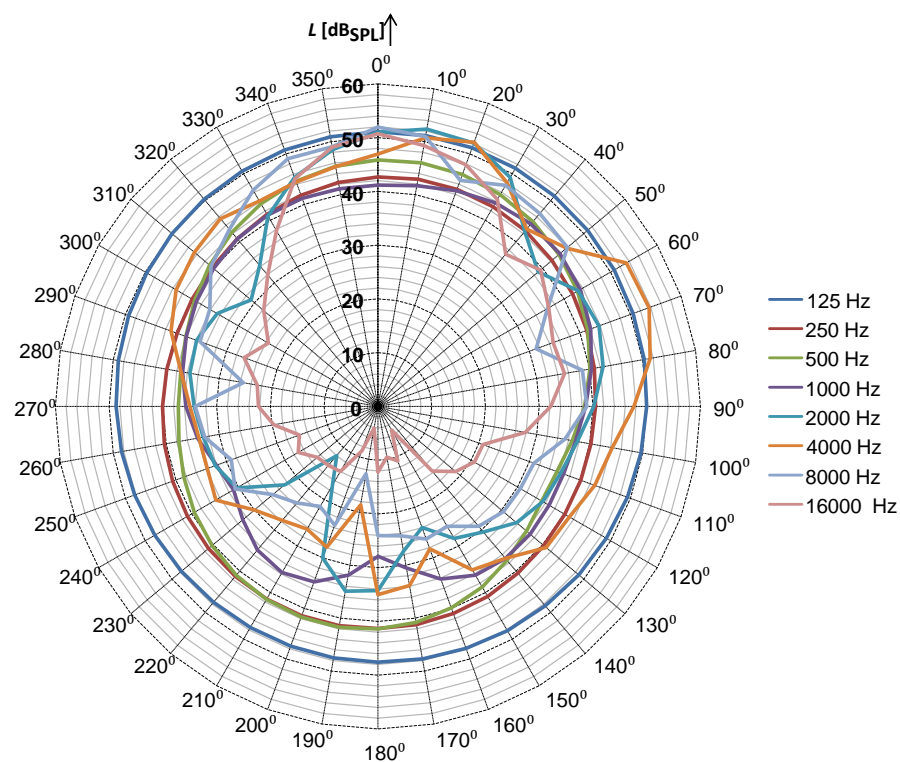
Měření směrové charakteristiky jsem provedl v bezodrazové místnosti za použití stejného měřicího řetězce jako v kapitole 9.3. Reproduktorová soustava byla položena na bok na otočném podstavci a měřicí mikrofon byl umístěn v akustické ose reproduktorové soustavy a tím bylo možné změřit směrovou charakteristiku v její vertikální ose. Měření jsem provedl pro zapojení s HRFT i bez HRTF filtru v kombinaci bez přesahujících bočnic ozvučnice, s přesahujícími bočnicemi bez tlumení a s použitím tlumení.

Z naměřených hodnot vynesných do grafů zobrazených na obr.12.3, 12.4 a 12.5 jsem si ověřil vliv přesahujících bočnic ozvučnice na výslednou směrovou charakteristiku, které zmenší vertikální vyzařovací úhel reproduktorové soustavy na vyšších frekvencích, nízké frekvence díky jejich vlnové délce bočnice neovlivní. Přesahující ozvučnice zmenší vyzařovací úhel až o 10° ve směru k posluchači. Tím dojde k zamezení vyzařování přímých zvukových signálů k posluchači a posluchač může vnímat jen zvuk přicházející odrazem od stropu.

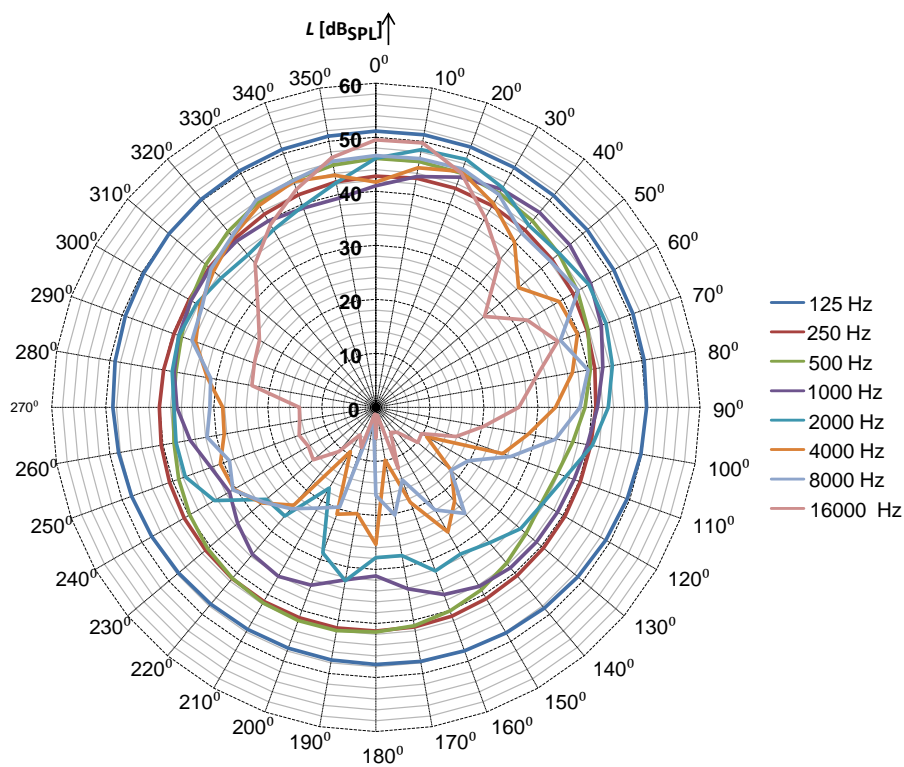
HRTF filtr nijak neovlivní výslednou směrovou charakteristiku, a proto jsem zde uvedl pouze grafy z naměřených hodnot, které byly změřeny bez fitru HRTF.



Obr. 12.3: Směrová charakteristika bez přesahujících bočnic



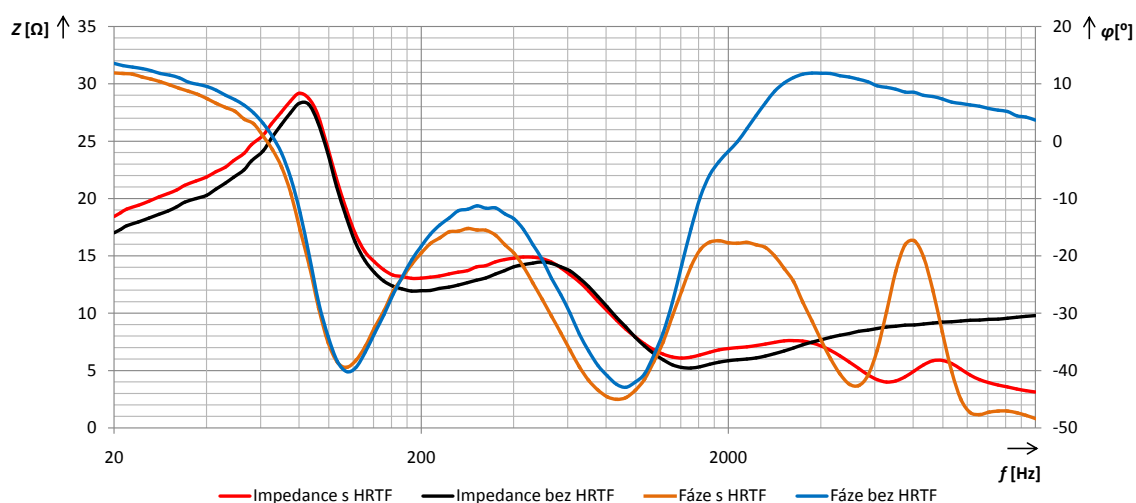
Obr. 12.4: Směrová charakteristika s přesahujícími bočnicemi



Obr. 12.5: Směrová charakteristika s přesahujícími bočnicemi a tlumením

12.3 Měření charakteristiky impedance a fáze

K měření impedanční a fázové charakteristiky reproduktorové soustavy jsem použil stejné metody jako v kapitole 9.1. Měření jsem provedl pro kmitočtovou výhybku s HRTF i bez HTRF filtru. Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu zobrazeného na obr. 12.6 z nich lze zjistit, že stejnosměrná impedance je vyšší při připojení HRTF filtru, což způsobí celkový útlum signálu vyzařovaného reproduktorovou soustavou a ovlivní charakteristiku fáze. Přesnou hodnotu stejnosměrné impedance R_e jsem změřil pomocí ohmmetru, kdy stejnosměrná impedance nabývá hodnoty s HRTF filtrem $14,54\Omega$ a bez něj $12,38\Omega$.



Obr. 12.6: Impedanční a fázová charakteristika reproduktorové soustavy

Výsledné stejnosměrné impedance vycházejí ve srovnání s běžnými impedancemi reproduktorových soustav použitými v domácím kinu poměrně vysoká což bude mít za příčinu její nižší výslednou citlivost. Takto vysoká stejnosměrná impedance je způsobena složitostí kmitočtové výhybky, kde bylo použito velké množství korekcí zejména u středobasového reproduktoru, přičemž impedanci nejvíce zvýší korekce baffle step.

13 ZÁVĚR

Náplní této bakalářské práce bylo nastudování principu nahoru vyzařujících reproduktorových soustav pro reprodukci stropního kanálu ve vícekanálovém 3D audio systému Dolby Atmos a jejich následná realizace.

Hlavními kritérii pro výběr vhodných měničů byly šířka výsledného kmitočtového pásma a cenová dostupnost. Ideální variantou by byl koaxiální měnič, ale cena koaxiálních měničů, které umí reprodukovat požadovanou šířku kmitočtového pásma, je poměrně vysoká. Proto jsem použil kombinaci středobasového (SPH135–Kep) a vysokotónového (DT28–N) měniče od společnosti Monacor, s kterými docílím požadované šířky kmitočtového pásma od 180 Hz do 20 kHz.

Pro návrh ozvučnice reproduktorové soustavy jsem vycházel ze zadaného půdorysu podstavy 199 mm × 299 mm a dle vnitřního objemu jsem dopočítával její výšku. Na základě provedených simulací uzavřené ozvučnice a ozvučnice typu bas-reflex jsem zvolil uzavřenou ozvučnici s maximální vnější výškou 18 cm a vnitřním objemem 4,28 litrů, která s kombinací zvolených měničů splní požadavky na reprodukci stropního kanálu systému Dolby Atmos. Oproti standardním ozvučnicím má mnou sestavená ozvučnice úkos vrchní strany 20° pro nasměrování zvukových signálů směrem ke stropu a přesahující okraje, které svým akustickým stínem zabrání vyzařování přímých vln k posluchači.

Návrh kmitočtové výhybky vychází z topologie výhybky uváděné společností Monacor. Tu jsem musel přizpůsobit součástkám dostupným na trhu a mnou použitým měničům, u středobasového měniče jsem musel přidat korekci baffle step pro eliminaci zadní vlny a pásmovou zádrž pro eliminaci rezonance na 1600 Hz. U vysokotónového měniče jsem přidal útlumový článek a rezistor před horní propust pro vyrovnaní citlivosti se středobasovým měničem. Dalším důležitým blokem výhybky je HRTF filtr, který je umístěn před kmitočtovou výhybkou a lze jej zapojením vstupních svorek vyřadit. Výhybka je rozdělena na tři DPS kvůli jednoduché montáži a možnosti upravení vlastností jednotlivých bloků.

Z naměřených charakteristik a vlastností zkonstruované reproduktorové soustavy jsem si ověřil, že splňuje požadavky na reprodukci stropního kanálu v systémech Dolby Atmos. Výsledná stejnosměrná impedance reproduktorové soustavy nabývá na kmitočtech od 20 Hz do 800 kHz vyšších hodnot než je standardní a na vyšších kmitočtech obvod HRTF impedanci zmenší na polovičku standardní hodnoty, s čímž můžou některé zesilovače mít problém. Z frekvenčních charakteristik je patrný zdvih v oblasti dělicího kmitočtu, ten by bylo vhodné zmírnit upravením strmostí filtrů, a tím by výsledná charakteristika byla zcela ideální.

V rámci zadání jsem měl provést poslechové testy, které z důvodu nevhodných podmínek v laboratořích nemohly být provedeny. Laboratoře neobsahují odrazivé stropy, a zavěšení konstrukce, na kterou by bylo možno upevnit falešný strop, nebylo možné provést z důvodu velké váhy falešného stropu.

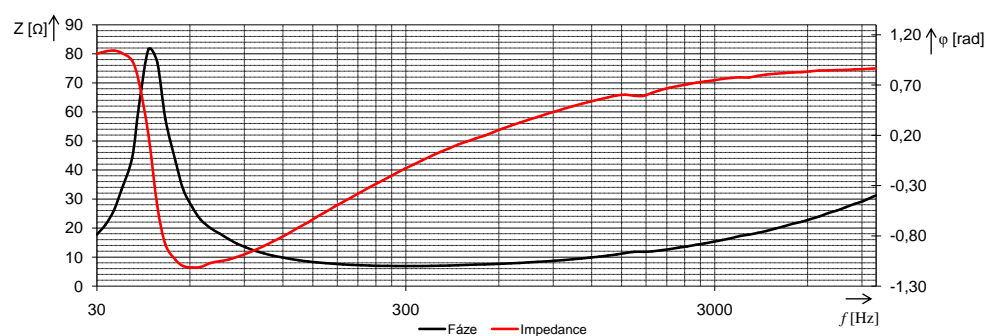
LITERATURA

- [1] DOLBY LABORATORIES, Dolby Atmos Next-Generation Audio for Cinema. [Online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <<https://www.dolby.com/us/en/professional/cinema/products/dolby-atmos-next-generation-audio-for-cinema-white-paper.pdf>>
- [2] DOLBY LABORATORIES, Dolby Atmos Home Theater Installation Guidelines - July 2016. [Online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <<http://www.dolby.com/us/en/technologies/dolby-atmos/dolby-atmos-home-theater-installation-guidelines.pdf>>
- [3] DOLBY LABORATORIES, Dolby Atmos for the Home Theatre - October 2016. [Online]. [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <<https://www.dolby.com/us/en/technologies/dolby-atmos/dolby-atmos-for-the-home-theater.pdf>>
- [4] TOMAN, Kamil. Reprodukory a reprosoustavy 1. díl. Dexon, 2001.
- [5] SCHIMMEL, Jiří. Elektroakustika. Brno, 2016. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] DELLASALA, Gene. Are HRTF's Necessary in Dolby Atmos Elevation Speakers? [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <<http://www.audioholics.com/loudspeaker-design/hrtf-and-elevated-sound-dolby-atmos>>
- [7] LÁNIČEK, Robert. Elektronika: obvody-součástky-děje. 1. Praha: BEN-technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-25-2.
- [8] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. Kmitočtové filtry. Praha: BEN-technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-023-7.
- [9] Crockett, B. and Chabanne, C. and Tuffy, M. and Seefeldt, A. and Brown, C.P. and TURNMIRE, P., Virtual height filter for reflected sound rendering using upward firing drivers, July-2014, Google Patents, WO Patent App. PCT/US2014/010,466. Dostupné z: <<https://www.google.com/patents/WO2014107714A1?cl=en>>

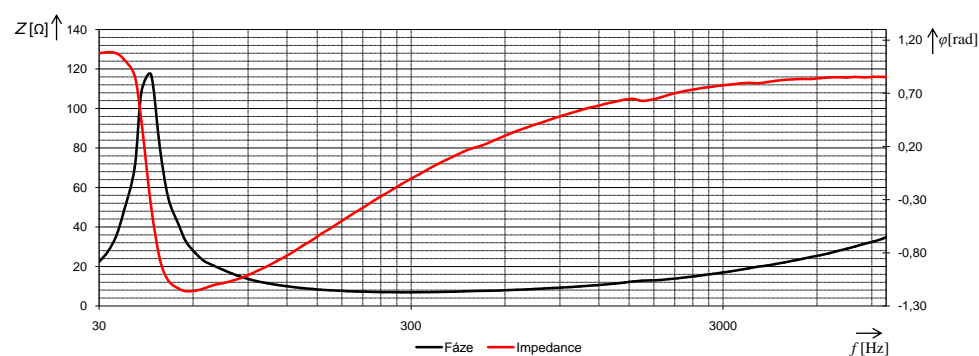
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DPS	Deska plošných spojů
EBP	Činitel určující vhodný typ ozvučnice – Efficiency Bandwidth Product
f_s	Střední kmitočet
f_r	Rezonanční kmitočet
HRTF	Přenosová funkce hlavy – Head related transfer function
L_e	Indukčnost kmitací cívky reproduktoru
LFE	Kanál pro nízkofrekvenční zvukové efekty – Low frequency effects
M.D.F	Dřevovláknitá deska – Medium density fibre board
R_e	Stejnoseměrný odpor kmitací cívky reproduktoru

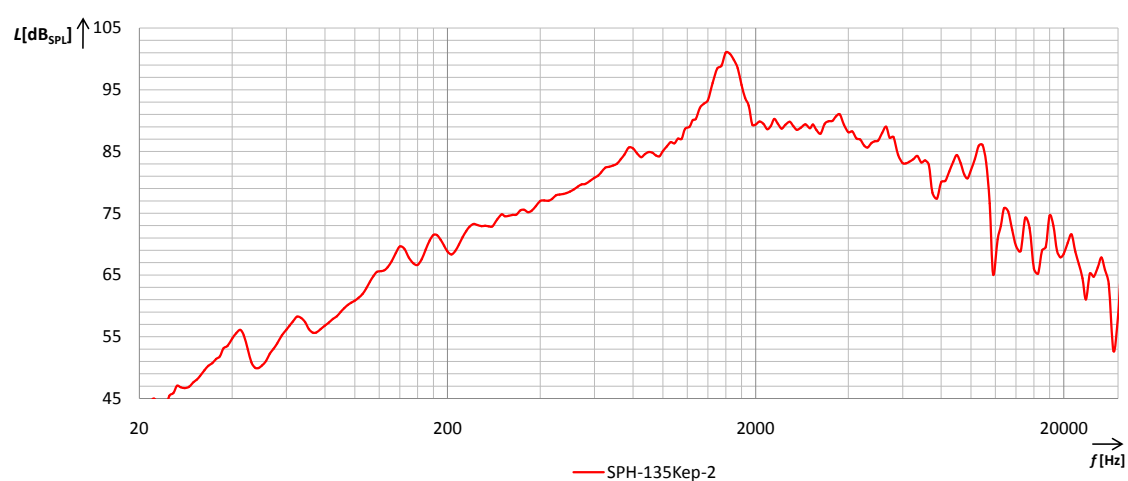
A PŘÍLOHY



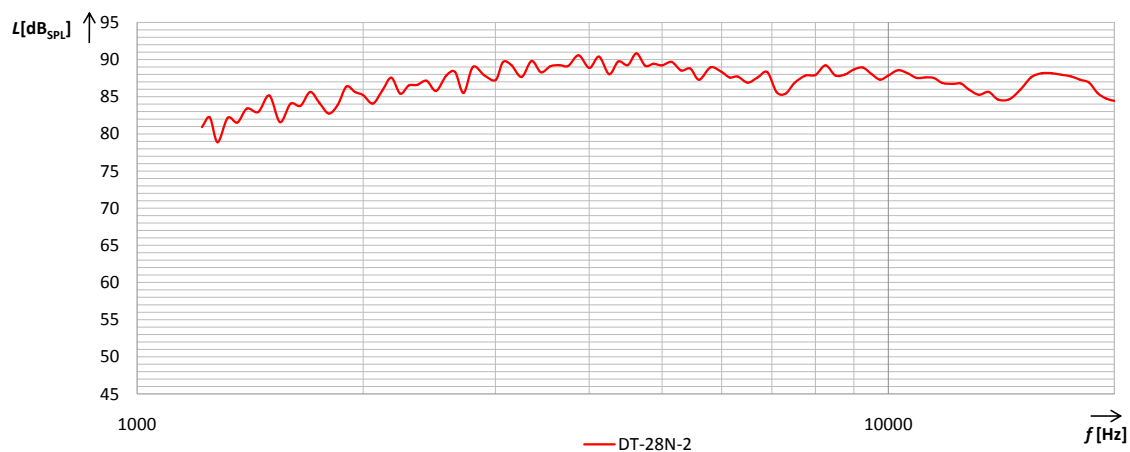
Obr. A.1: Impedanční a fázová charakteristika SPH-135Kep-1



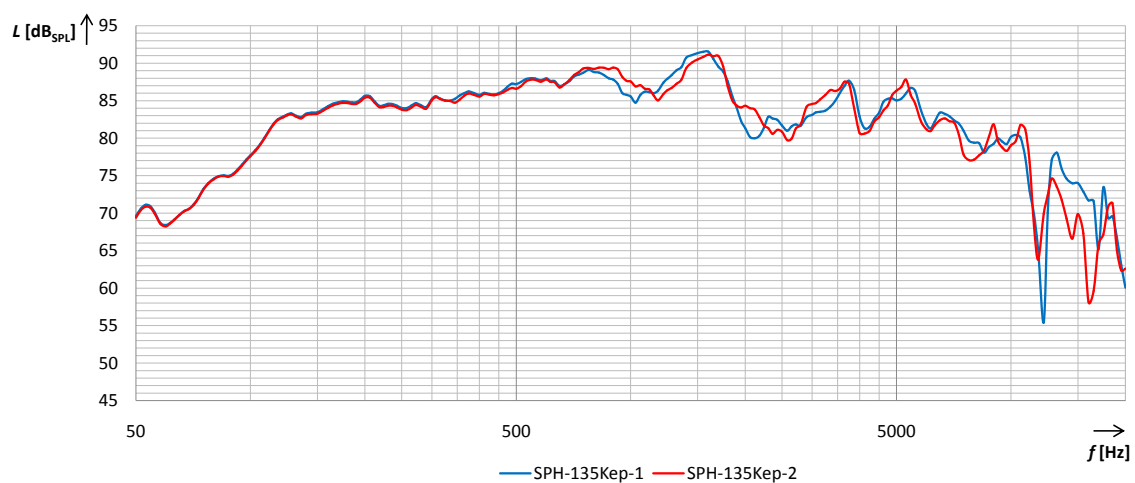
Obr. A.2: Impedanční a fázová charakteristika SPH-135Kep-2



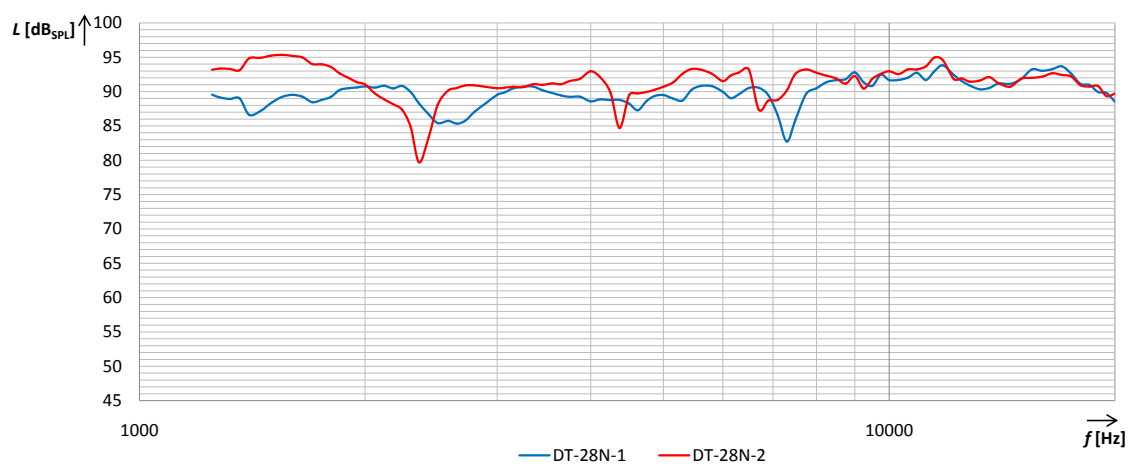
Obr. A.3: Frekvenční charakteristika volně zavěšeného SPH-135Kep-2



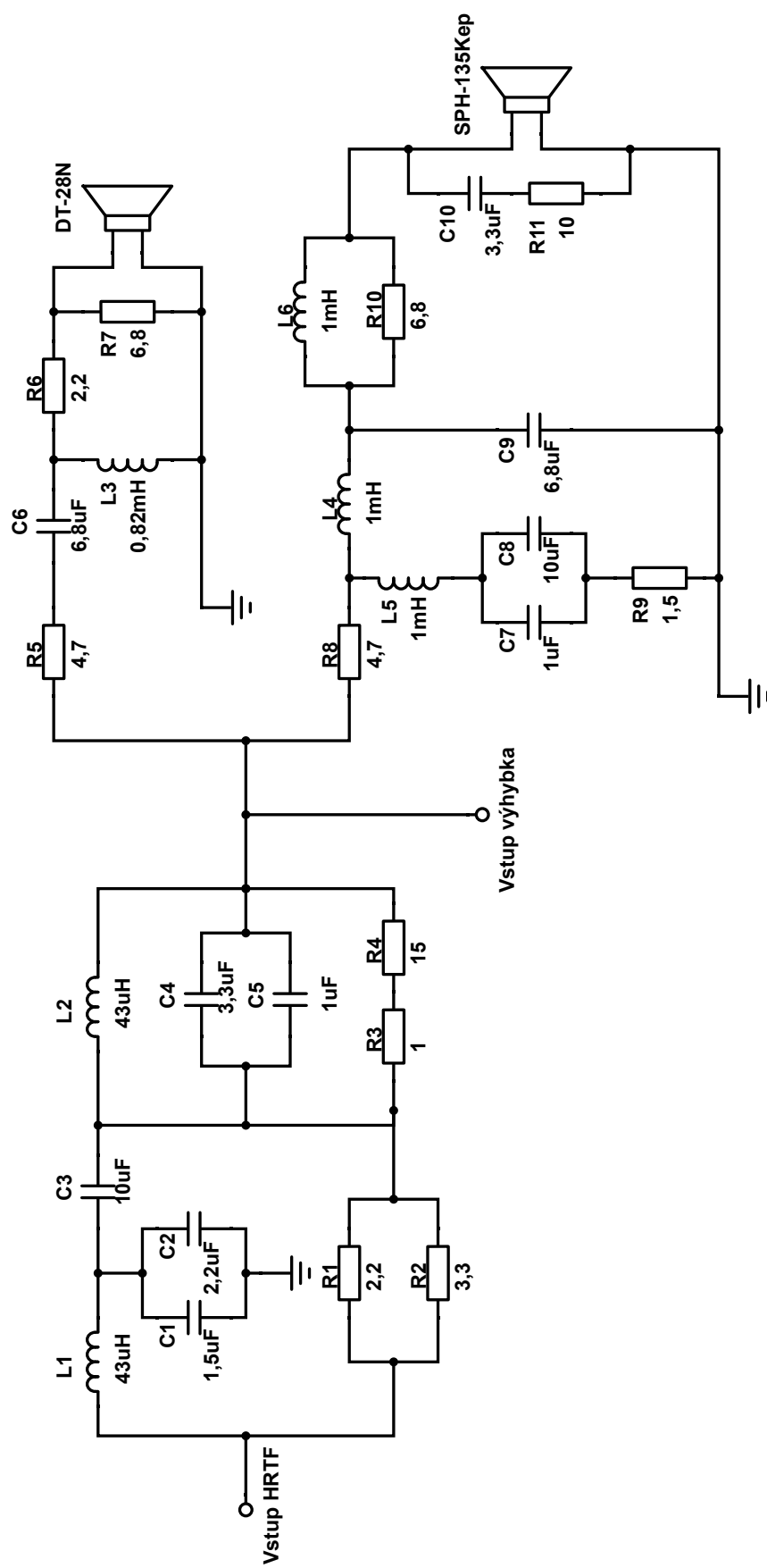
Obr. A.4: Frekvenční charakteristika volně zavěšeného DT-28N-2



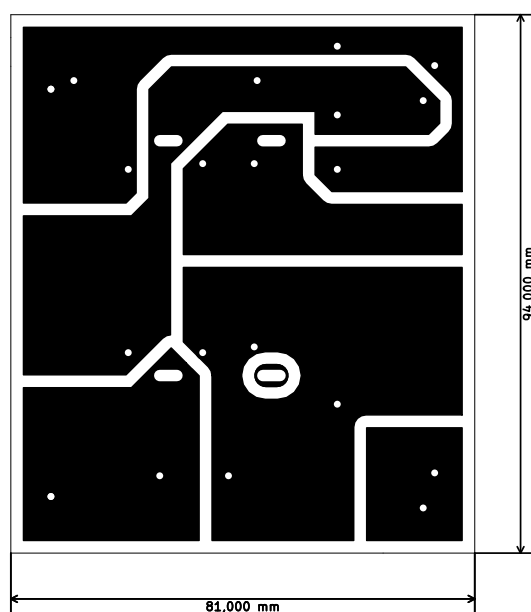
Obr. A.5: Frekvenční charakteristiky SPH-135Kep v ozvučnici



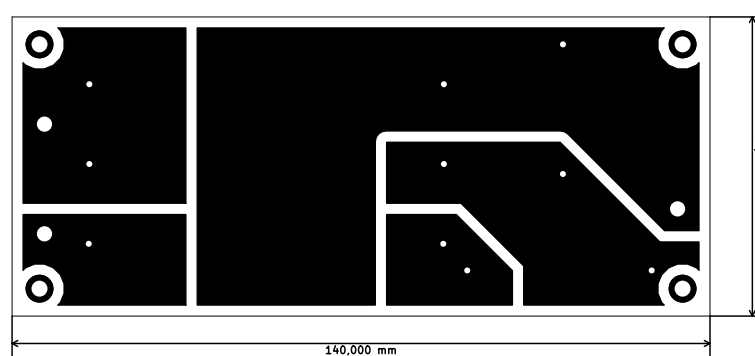
Obr. A.6: Frekvenční charakteristiky DT-28N-2 v ozvučnici



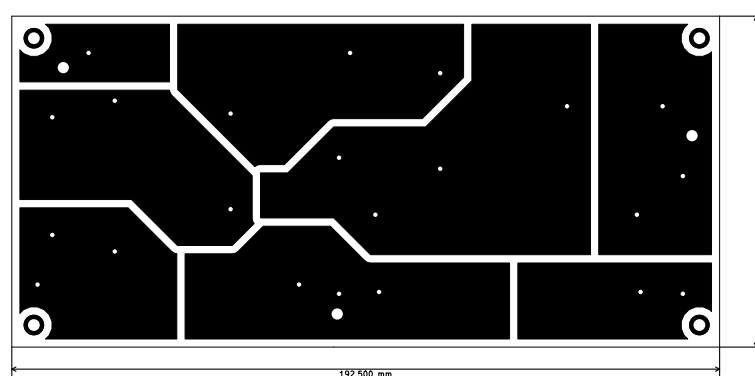
Obr. A.7: Schéma zapojení kmitočtové výhybky



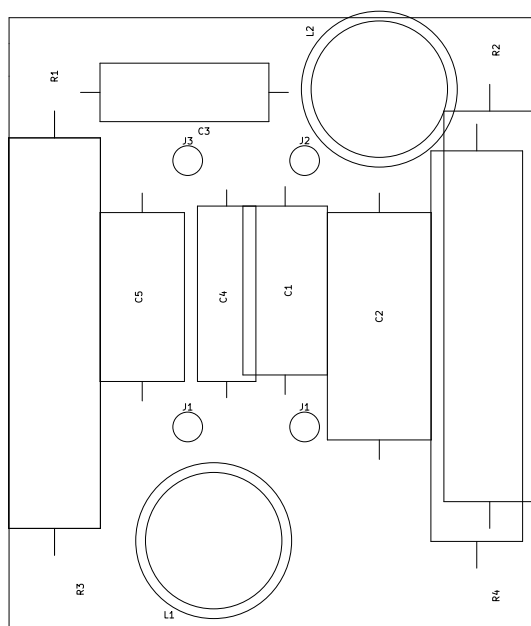
Obr. A.8: DPS pro HRTF filtr



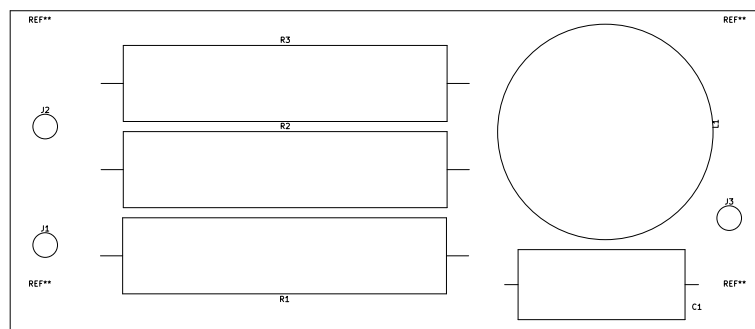
Obr. A.9: DPS pro kmitočtovou výhybku 1. část



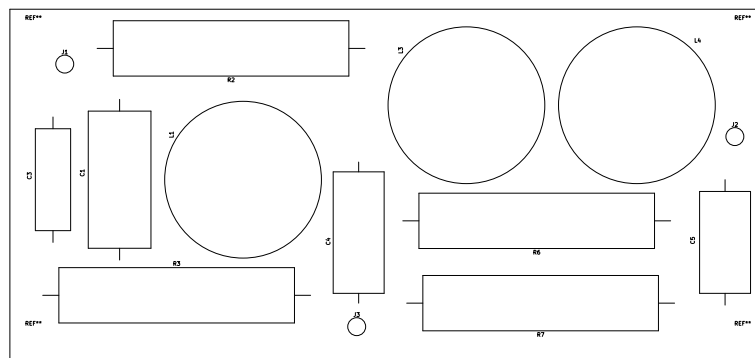
Obr. A.10: DPS pro kmitočtovou výhybku 2. část



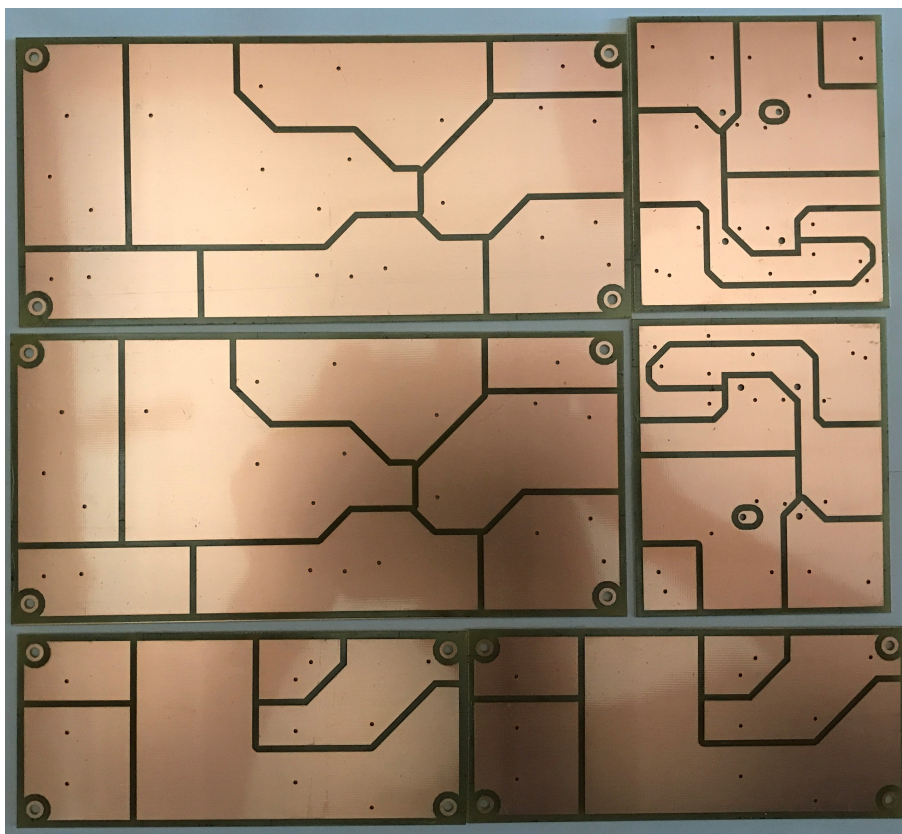
Obr. A.11: Osazovací plán pro DPS HRTF filtru



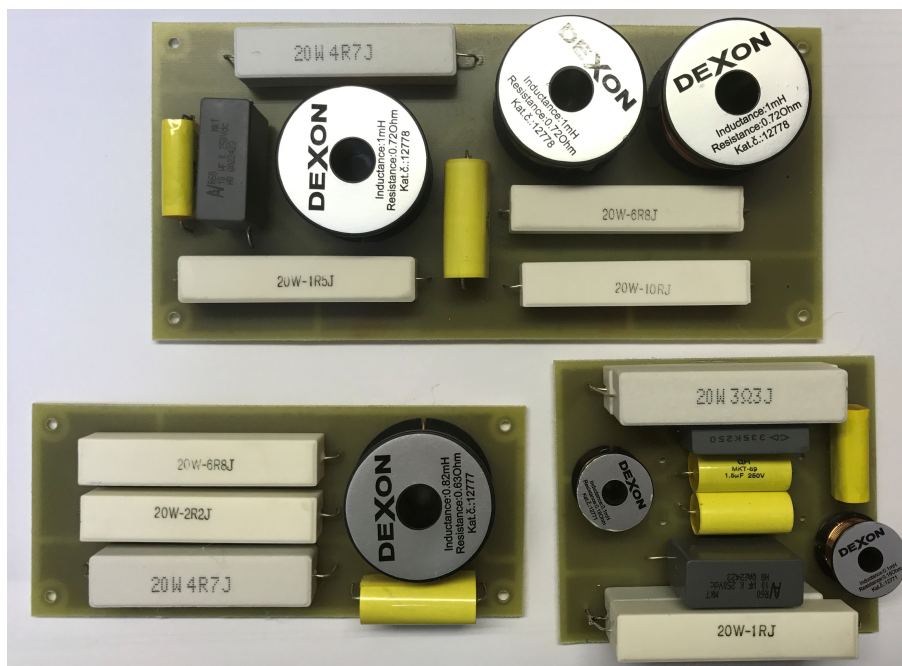
Obr. A.12: Osazovací plán pro DPS kmitočtové výhybky 1. část



Obr. A.13: Osazovací plán pro DPS kmitočtové výhybky 2. část



Obr. A.14: Zhotovené desky plošných spojů kmitočtové výhybky



Obr. A.15: Osazené desky plošných spojů kmitočtové výhybky



Obr. A.16: Reproduktorová soustava bez bočnic



Obr. A.17: Reproduktorová soustava s bočnicemi